

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Construções Rurais e Ambiente

Influência da tipologia de cobertura e aberturas de ventilação no conforto térmico em habitação de interesse social

Gisele Caldas de Araújo Cunha



Campina Grande/ PB

2013

Gisele Caldas de Araújo Cunha

**INFLUÊNCIA DA TIPOLOGIA DE COBERTA E
ABERTURAS DE VENTILAÇÃO NO CONFORTO TÉRMICO
EM HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola,
Universidade Federal de Campina Grande/PB,
para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

Orientador: José Pinheiro Lopes Neto

Campina Grande/ PB

Dezembro de 2013

“When I was 5 years old, my mother always told me
that happiness was the key to life.
When I went to school, they asked me
what I wanted to be when I grew up.
I wrote down: HAPPY.
They told me I didn’t understand the assignment
and I told them they didn’t understand life”

John Lennon

Agradecimentos

A **Deus**, por Sua presença constante e amorosa em minha vida.

A meu querido esposo, **Ronnie**, pelo apoio incondicional nesta trajetória.

A meus amados filhos, **Rafael e Heitor**, pela compreensão e paciência nos momentos em que estive menos presente em sua vida.

A todos os meus **familiares e amigos** que torceram pela concretização deste sonho.

Ao amigo, **Pinheiro Neto**, pela confiança em mim depositada e constante incentivo nas horas de dificuldade.

Aos demais **professores e funcionários da COPEAG**, pela atenção e valiosos ensinamentos.

Aos **colegas de mestrado e laboratório**, pelo convívio harmonioso.

Aos arquitetos **Raoni Venâncio, Andréia Cardoso e Nathália Queiroz**, por sua decisiva contribuição durante o aprendizado do DesignBuilder.

Ao **CNPq**, pelo apoio financeiro durante o último semestre de pesquisa.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xii
Lista de Equações	xv
Estrutura do trabalho	xvii
Resumo	xviii
Abstract	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	4
1.1.1 Objetivo geral	4
1.1.2 Objetivos específicos	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Clima Semiárido Tropical	6
2.1.1 Semiárido brasileiro	8
2.1.2 Semiárido nordestino	9
2.1.3 Semiárido paraibano.....	10
2.2 Conforto térmico	12
2.2.1 Clima e Tempo x Homem x Edificação	14
2.2.1.1 Sistema termorregulador humano	15
2.2.1.2 O uso adequado da vestimenta.....	16
2.2.1.3 Invólucro climaticamente equilibrado	17
2.2.2 Variáveis do conforto térmico	18
2.2.2.1 Variáveis ambientais.....	18
2.2.2.2 Variáveis arquitetônicas.....	24
2.2.2.3 Variáveis humanas	25
2.2.2.3.1 Mensuráveis	25
2.2.2.3.2 Subjetivas.....	28
2.2.3 Índices para caracterização do ambiente térmico	28

2.2.3.1	Índice de Desconforto (DI) e de Temperatura e Umidade (THI)	30
2.2.3.2	Temperatura de Bulbo Úmido e de Globo (WBGT)	32
2.2.3.3	Voto Médio Estimado (PMV) e Percentual de Insatisfeitos (PPD)	33
2.2.3.4	Temperatura Fisiológica Equivalente (PET)	36
2.2.4	Desempenho térmico do envelope construtivo	38
2.2.4.1	Recomendações técnicas e construtivas para a zona bioclimática 08 (ZB08).....	40
2.2.4.2	Comportamento térmico dos fechamentos	42
2.2.4.2.1	Fluxo térmico através de fechamentos opacos.....	42
2.2.4.2.2	Fluxo térmico através de fechamentos transparentes	45
2.2.5	Ventilação natural	47
2.2.5.1	Ventilação por diferença de pressão por ação dos ventos.....	48
2.2.5.2	Ventilação por diferença de pressão por temperatura.....	51
2.3	Simulação Computacional.....	52
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	54
3.1	Caracterização climática de Campina Grande	54
3.2	Descrição dos tratamentos	54
3.3	Caracterização do meio experimental.....	55
3.3.1	A unidade habitacional	55
3.3.1.1	O partido arquitetônico	56
3.3.1.2	A implantação	57
3.3.1.3	A planta baixa	58
3.3.2	O objeto de estudo.....	59
3.4	Instrumentação para coleta e armazenamento de dados.....	62
3.4.1	Sistema de aquisição de dados.....	62
3.4.2	Medição de temperatura.....	63
3.4.2.1	Calibração dos sensores de temperatura	63
3.4.2.2	Confecção do globo negro.....	65
3.4.2.3	Calibração dos globos	65

3.4.2.4	Distribuição dos sensores de temperatura.....	66
3.4.3	Medição da velocidade do ar.....	69
3.5	Análise da temperatura e da umidade relativa do ar.....	70
3.6	Caracterização do ambiente térmico.....	71
3.6.1	Cálculo dos índices térmicos.....	71
3.6.1.1	Cálculo do DI e THI.....	71
3.6.1.2	Cálculo do WBGT.....	72
3.6.1.3	Cálculo do PMV/PPD.....	73
3.6.1.4	Cálculo do PET.....	74
3.7	Avaliação do desempenho térmico.....	75
3.7.1	Cálculo das propriedades térmicas dos fechamentos.....	75
3.7.1.1	Resistência térmica total (R_T).....	77
3.7.1.2	Transmitância térmica (U).....	78
3.7.1.3	Capacidade térmica (C_T).....	79
3.7.1.4	Atraso térmico (φ).....	80
3.7.1.5	Fator de ganho de calor solar (FS_o).....	81
3.8	Calibração do modelo computacional.....	82
3.8.1	Modelo de referência.....	82
3.8.2	Calibração do modelo final.....	85
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
4.1	Temperatura de bulbo seco (t_{bs}).....	87
4.2	Umidade relativa (UR).....	90
4.3	Índices térmicos.....	92
4.3.1	Índice de Desconforto (DI) e de Temperatura e Umidade (THI).....	92
4.3.2	Temperatura de Bulbo Úmido e de Globo (WBGT).....	96
4.3.3	Voto Médio Estimado (PMV) e Percentual de Insatisfeitos (PPD).....	99
4.3.4	Temperatura Fisiológica equivalente (PET).....	106
4.4	Análise do desempenho térmico.....	110
4.4.1	Método simplificado.....	110

4.4.1.1	Propriedades térmicas dos elementos de vedação	110
4.4.1.2	Verificação do atendimento às exigências normativas	111
4.4.1.3	Aberturas de ventilação	112
4.4.2	Método por medição	113
4.4.3	Comportamento térmico das vedações.....	114
4.4.3.1	Temperaturas superficiais das paredes	114
4.4.3.2	Temperaturas superficiais da cobertura.....	120
4.5	Calibração do modelo computacional	123
5	CONCLUSÕES.....	131
6	PROPOSTAS PARA ESTUDOS COMPLEMENTARES.....	133
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134

Lista de Figuras

Figura 1-	Representação esquemática das principais zonas climáticas terrestres	6
Figura 2-	Tipos de climas da Terra	7
Figura 3-	Nova delimitação do Semiárido brasileiro	8
Figura 4-	Tipos de clima do Estado da Paraíba, segundo Köeppen	10
Figura 5-	Delimitação do Semiárido paraibano, de suas microrregiões e do Município de Campina Grande	11
Figura 6-	Zoneamento bioclimático brasileiro	40
Figura 7-	Fases do processo de transmissão de calor em fechamentos opacos	43
Figura 8-	Comportamento de materiais transparentes à radiação de ondas curtas, longas e luz visível	47
Figura 9-	Modelo esquemático do movimento do ar ao redor de um edifício	49
Figura 10-	Esquema horizontal do fluxo de ar no interior de uma edificação em função de suas subdivisões	50
Figura 11-	Esquema do efeito direcional em função das aberturas de entrada do ar	50
Figura 12-	Esquema, em elevação, de modelos de fluxo de ar por “efeito chaminé”	51
Figura 13-	Vista das fachadas Leste (frontal) e Norte (lateral direita)	56
Figura 14-	Vista das fachadas Norte (lateral direita) e Oeste (posterior)	56
Figura 15-	Imagem superior com implantação da unidade habitacional	58
Figura 16-	Plantas baixas dos pavimentos térreo e mezanino	58
Figura 17-	Plantas baixas da sala e do mezanino, ambientes do objeto de estudo	59
Figura 18-	Corte longitudinal da sala e mezanino	60
Figura 19-	Vedação do vão de comunicação entre sala e cozinha	61
Figura 20-	Sistema de aquisição de dados	63
Figura 21-	Abrigo para sensor de medição da t_{bs} exterior	67
Figura 22-	Conjuntos de sensores de temperatura, na sala e no mezanino	67
Figura 23-	Etapas da fixação dos sensores para medição de temperatura superficial exterior	68
Figura 24-	Localização dos sensores para medição de temperatura superficial de paredes	69

Figura 25-	Pontos de medição de velocidade do vento	70
Figura 26-	Definição das zonas do pavimento térreo, do mezanino e volumetria do modelo final	83
Figura 27-	Curvas de t_{bs} exterior, t_{bs} SALA e t_{bs} MEZ, para JBCfe	87
Figura 28-	Curvas de t_{bs} exterior, t_{bs} SALA e t_{bs} MEZ, para Bab_Cfe	87
Figura 29-	Curvas de t_{bs} exterior, t_{bs} SALA e t_{bs} MEZ, para Bab_Cab	88
Figura 30-	Curvas de t_{bs} exterior, t_{bs} SALA e t_{bs} MEZ, para JBab_Cfe	88
Figura 31-	Curvas de t_{bs} exterior, t_{bs} SALA e t_{bs} MEZ, para JBab_Cab	88
Figura 32-	Curvas de UR do ambiente da sala, para os cinco tratamentos	91
Figura 33-	Curvas de UR do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos	91
Figura 34-	Curvas de DI do ambiente da sala, para os cinco tratamentos	93
Figura 35-	Curvas de DI do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos	93
Figura 36-	Curvas de THI do ambiente da sala, para os cinco tratamentos	95
Figura 37-	Curvas de THI do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos	95
Figura 38-	Curvas de WBGT do ambiente da sala, para os cinco tratamentos	97
Figura 39-	Curvas de WBGT do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos	97
Figura 40-	Curvas de PMV do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 1)	100
Figura 41-	Curvas de PPD do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 1)	101
Figura 42-	Curvas de PMV do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 1)	102
Figura 43-	Curvas de PPD do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 1)	102
Figura 44-	Curvas de PMV do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 2)	103
Figura 45-	Curvas de PPD do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 2)	104
Figura 46-	Curvas de PMV do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 2)	105
Figura 47-	Curvas de PPD do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 2)	105

Figura 48-	Curvas de PET do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 1)	107
Figura 49-	Curvas de PET do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 1)	107
Figura 50-	Curvas de PET do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 2)	108
Figura 51-	Curvas de PET do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 2)	109
Figura 52-	t_s ext e t_s int da parede Leste (sala), para JBCfe.	115
Figura 53-	t_s ext e t_s int da parede Norte (sala), para JBCfe	115
Figura 54-	t_s ext e t_s int da parede Leste (sala), para Bab_Cfe	115
Figura 55-	t_s ext e t_s int da parede Norte (sala), para Bab_Cfe	115
Figura 56-	t_s ext e t_s int da parede Leste (sala), para Bab_Cab	115
Figura 57-	t_s ext e t_s int da parede Norte (sala), para Bab_Cab	115
Figura 58-	t_s ext e t_s int da parede Leste (sala), para JBab_Cfe	116
Figura 59-	t_s ext e t_s int da parede Norte (sala), para JBab_Cfe	116
Figura 60-	t_s ext e t_s int da parede Leste (sala), para JBab_Cab	116
Figura 61-	t_s ext e t_s int da parede Norte (sala), para JBab_Cab	116
Figura 62-	Simulação da posição solar e sombreamento da face Leste às 7:00 h, 8:00 h e 9:00 h	116
Figura 63-	Simulação da posição solar e sombreamento das faces Norte e Oeste às 9:00 h, 12:00 h e 15:00 h	117
Figura 64-	t_s ext e t_s int da parede Norte (mezanino), para JBCfe	118
Figura 65-	t_s ext e t_s int da parede Oeste (mezanino), para JBCfe	118
Figura 66-	t_s ext e t_s int da parede Norte (mezanino), para Bab_Cfe	118
Figura 67-	t_s ext e t_s int da parede Oeste (mezanino), para Bab_Cfe	118
Figura 68-	t_s ext e t_s int da parede Norte (mezanino), para Bab_Cab	118
Figura 69-	t_s ext e t_s int da parede Oeste (mezanino), para Bab_Cab	118
Figura 70-	t_s ext e t_s int da parede Norte (mezanino), para JBab_Cfe	118
Figura 71-	t_s ext e t_s int da parede Oeste (mezanino), para JBab_Cfe	118
Figura 72-	t_s ext e t_s int da parede Norte (mezanino), para JBab_Cab	119
Figura 73-	t_s ext e t_s int da parede Oeste (mezanino), para JBab_Cab	119
Figura 74-	t_s sup e t_s inf, para JBCfe	120
Figura 75-	t_s sup e t_s inf, para Bab_Cfe	120
Figura 76-	t_s sup e t_s inf, para Bab_Cab	120
Figura 77-	t_s sup e t_s inf, para JBab_Cfe	120

Figura 78-	t_s sup e t_s inf, para JBab_Cab	120
Figura 79-	Simulação da posição solar no dia 20/06 às 11:00 h	121
Figura 80-	Curvas das t_{bs} médias simuladas e coletadas, para JBCfe	123
Figura 81-	Curvas das t_{bs} médias simuladas e coletadas, para Bab_Cfe	124
Figura 82-	Curvas das t_{bs} médias simuladas e coletadas, para Bab_Cab	124
Figura 83-	Curvas das t_{bs} médias simuladas e coletadas, para JBab_Cfe	124
Figura 84-	Curvas das t_{bs} médias simuladas e coletadas, para Bab_Cab	125
Figura 85-	Curvas das diferenças entre t_{bs} médias coletadas e simuladas, para JBCfe	125
Figura 86-	Curvas das diferenças entre t_{bs} médias coletadas e simuladas, para Bab_Cfe	126
Figura 87-	Curvas das diferenças entre t_{bs} médias coletadas e simuladas, para Bab_Cab	126
Figura 88-	Curvas das diferenças entre t_{bs} médias coletadas e simuladas, para JBab_Cfe	126
Figura 89-	Curvas das diferenças entre t_{bs} médias coletadas e simuladas, para JBab_Cab	127
Figura 90-	Forma de abertura das bandeiras na condição real (a) e na simulada (b)	127
Figura 91-	Captação do vento por bandeiras com eixo pivotante horizontal na condição real (a) e na simulada (b)	128
Figura 92-	Amplitude térmica e diferença das médias de t_{bs} coletada e simulada para cada ambiente, durante JBCfe	128
Figura 93-	Amplitude térmica e diferença das médias de t_{bs} coletada e simulada para cada ambiente, durante Bab_Cfe	129
Figura 94-	Amplitude térmica e diferença das médias de t_{bs} coletada e simulada para cada ambiente, durante Bab_Cab	129
Figura 95-	Amplitude térmica e diferença das médias de t_{bs} coletada e simulada para cada ambiente, durante JBab_Cfe	129
Figura 96-	Amplitude térmica e diferença das médias de t_{bs} coletada e simulada para cada ambiente, durante JBab_Cab	130

Lista de Tabelas

Tabela 1-	Relação dos Estados e número de Municípios integrantes do Semiárido brasileiro (BRASIL, 2005)	8
Tabela 2-	Escala Beaufort de Ventos (BARROSO-KRAUSE, 2005)	23
Tabela 3-	Taxa metabólica para diversas atividades, segundo ISO 7730 (ISO, 2005)	26
Tabela 4-	Isolamento térmico para peças de vestuário, segundo ISO 7730 (ISO, 2005)	27
Tabela 5-	Índices de conforto térmico e suas variáveis intervenientes (MONTEIRO, 2008)	29
Tabela 6-	Intervalos de DI e classificação do ambiente térmico (THOM, 1959)	31
Tabela 7-	Intervalos de THI e classificação do ambiente térmico (FANGER, 1972)	31
Tabela 8-	Limites de WBGT em função do tipo de atividade e regime de trabalho segundo NR 15 (BRASIL, 1978)	33
Tabela 9-	Valores de referência de WBGT para ambientes quentes, segundo ISO 7243 (ISO 7243, 1989)	33
Tabela 10-	Escala de 7 pontos de sensação térmica, segundo ISO 7730 (ISO, 2005)	34
Tabela 11-	Faixas interpretativas para PET (MONTEIRO, 2008)	38
Tabela 12-	Valores admissíveis para vedações externas do tipo leve refletora, segundo NBR 15220:3 (ABNT, 2005)	41
Tabela 13-	Valores mínimos de U e C_T para habitações localizadas na ZB08, segundo NBR 15575:4 (ABNT, 2013)	41
Tabela 14-	Valores de U para coberturas de habitações localizadas na ZB08, segundo NBR 15575:5 (ABNT, 2013)	42
Tabela 15-	Valores de absorvância e refletância de alguns materiais (NBR 15220:2, 2005)	43
Tabela 16-	Valores de emissividade de alguns materiais, segundo NBR 15220:2 (ABNT, 2005)	45
Tabela 17-	Resistências térmicas superficiais, segundo NBR15220:2 (ABNT, 2005)	45
Tabela 18-	Nomenclatura adotada, descrição dos tratamentos e período de coleta de dados	55

Tabela 19-	Materiais construtivos empregados nos elementos da envoltória	62
Tabela 20-	Equações de correção aplicadas aos dados de temperatura registrados nos respectivos termopares	64
Tabela 21-	Equações de calibração para os globos em plástico em função dos globos padrão	65
Tabela 22-	Distribuição dos sensores de temperatura	66
Tabela 23-	Parâmetros adotados para cálculo das propriedades térmicas de paredes	76
Tabela 24-	Valores adotados para absorvância e propriedades térmicas da cobertura	76
Tabela 25-	Ajuste do período de simulação para cada tratamento, em função da t_{bs} exterior	86
Tabela 26-	t_{bs} média máxima e diferença de temperatura entre interior e exterior para cada tratamento	90
Tabela 27-	Classificação do ambiente, segunda a UR, para cada ambiente e tratamento	92
Tabela 28-	Valores médios, máximo e mínimo, e classificação do ambiente segundo DI	94
Tabela 29-	Valores médios (máximo e mínimo) e classificação do ambiente segundo THI	96
Tabela 30-	Valores médios (máximo e mínimo) de WBGT e classificação do ambiente térmico, segundo NR 15 (BRASIL, 1978)	98
Tabela 31-	Classificação térmica do ambiente em função dos valores definidos pela ISO 7243 (ISO, 1989)	99
Tabela 32-	Valores médios (máximo e mínimo) de PMV e PPD para sala e mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 1)	101
Tabela 33-	Valores médios (máximo e mínimo) de PMV e PPD para sala e mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 2)	104
Tabela 34-	Valores médios (máximo e mínimo) de PET para sala e mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 1)	108
Tabela 35-	Valores médios (máximo e mínimo) de PET para sala e mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 2)	109
Tabela 36-	Valores calculados e adotados para as propriedades térmicas das paredes e cobertura da edificação	110

Tabela 37-	Valores recomendados pelas normas de referência para habitações na ZB08 e aqueles calculados para cada propriedade térmica de parede	111
Tabela 38-	Valores recomendados e adotados pelas normas de referência para habitações na ZB08, para cada propriedade térmica de cobertura	111
Tabela 39-	Valores recomendados para habitações na ZB08 e calculados das áreas de abertura para ventilação de sala e mezanino	112
Tabela 40-	Diferenças de temperatura mínima do ar entre os ambientes estudados e o exterior	114
Tabela 41-	Valores limites das temperaturas superficiais da cobertura, amplitude (A) e atraso térmico (ϕ), para cada tratamento	122

Lista de Equações

Equação 1-	Índice de Desconforto (DI)	30
Equação 2-	Índice de Temperatura e Umidade (THI)	31
Equação 3-	Índice de Temperatura de Bulbo úmido e de Globo (WBGT) para ambientes sem radiação solar direta	32
Equação 4-	Índice de Temperatura de Bulbo úmido e de Globo (WBGT) para ambientes com radiação solar direta	32
Equação 5-	Voto Médio Estimado (PMV)	34
Equação 6-	Temperatura da superfície da roupa (t_{cl})	34
Equação 7-	Coeficiente de troca de calor por convecção (h_c) - Caso 1	35
Equação 8-	Coeficiente de troca de calor por convecção (h_c) - Caso 2	35
Equação 9-	Fator de área de superfície de vestuário (f_{cl}) - Caso 1	35
Equação 10-	Fator de área de superfície de vestuário (f_{cl}) - Caso 2	35
Equação 11-	Percentual de Insatisfeitos (PPD)	36
Equação 12-	Balanco energético	37
Equação 13-	Fluxo de calor do centro corporal para a superfície da pele (F_{c-sk})	37
Equação 14-	Fluxo de calor da superfície da pele para a superfície externa da roupa (F_{sk-cl})	37
Equação 15-	Coeficiente de troca de calor por convecção natural	73
Equação 16-	Coeficiente de troca de calor por convecção forçada	73
Equação 17-	Temperatura radiante média (t_{rm}) - convecção natural	74
Equação 18-	Temperatura radiante média (t_{rm}) - convecção forçada	74
Equação 19-	Fator de correção da transmitância térmica (FT)	76
Equação 20-	Resistência térmica da parede, de superfície a superfície (R_t)	77
Equação 21-	Resistência térmica da seção A (R_a)	77
Equação 22-	Resistência térmica da seção B (R_b)	77
Equação 23-	Resistência térmica da seção C (R_c)	77
Equação 24-	Resistência térmica total da parede (R_T)	78
Equação 25-	Transmitância térmica da parede (U)	78
Equação 26-	Capacidade térmica total da parede (C_T)	79
Equação 27-	Capacidade térmica da seção A (C_a)	79
Equação 28-	Capacidade térmica da seção B (C_b)	79
Equação 29-	Capacidade térmica da seção C (C_c)	79

Equação 30-	Atraso térmico (φ)	80
Equação 31-	B_1 - para cálculo do atraso térmico	80
Equação 32-	B_0 - para cálculo do atraso térmico	80
Equação 33-	B_2 - para cálculo do atraso térmico	81
Equação 34-	Fator de ganho solar (FS_0)	81

Estrutura do trabalho

Esta dissertação é composta de sete partes: Introdução, Revisão bibliográfica, Material e métodos, Resultados e discussão, Conclusões, Propostas para estudos complementares e Referências bibliográficas.

Na primeira parte é apresentado o tema estudado, abordada sua importância e justificada sua relevância frente ao cenário regional e nacional. Os objetivos, geral e específico, se encontram aqui definidos; na segunda é feito um levantamento bibliográfico e normativo acerca de assuntos relacionados diretamente com o tema desta pesquisa, entre eles: clima do Semiárido; conforto térmico e índices para caracterização do ambiente térmico; desempenho térmico do envelope construtivo e ventilação natural.

Em Material e métodos, terceira parte, são apresentados os procedimentos para coleta de dados e a metodologia utilizada para alcançar os objetivos traçados. Nesta seção é feita a caracterização do município de Campina Grande e da unidade habitacional utilizada como meio experimental.

Na quarta parte são expostos os resultados obtidos a partir do monitoramento da unidade habitacional durante o período experimental; em seguida, esses resultados são discutidos por avaliações que consideram o comportamento térmico da edificação nos diferentes padrões de uso das aberturas de ventilação.

Na sequência, são listadas as conclusões obtidas por meio da análise dos resultados e as propostas de estudos adicionais que concorrerão para continuidade desta pesquisa.

Na penúltima parte são elencadas sugestões para pesquisas adicionais a fim de viabilizar avanços rumo a estratégias projetuais de edificação residencial climaticamente adequada às diversidades do Semiárido paraibano.

Por fim, são relacionadas todas as obras de literatura científica referenciadas nesta dissertação.

Resumo

O atendimento aos requisitos de abrigo e proteção contra os efeitos adversos do clima é o princípio norteador das formas arquitetônicas mais primárias. O surgimento e a disponibilidade mercantil de novos materiais e tecnologias construtivas modificaram significativamente o modo de pensar a arquitetura. O entusiasmo diante da gama de novas alternativas construtivas induziu à reprodução indiscriminada de propostas arquitetônicas adotadas em outras localidades com suas peculiaridades climáticas e culturais. Este trabalho analisa o conforto térmico de residência projetada para o Semiárido paraibano, caracterizada pelo uso da ventilação cruzada por pé-direito elevado e aberturas de ventilação posicionadas em diferentes alturas relativas ao solo. Diversos índices de conforto foram utilizados visando à caracterização dos ambientes internos; procedeu-se, em seguida, à avaliação de seu desempenho segundo as normas brasileiras em vigor e comportamento térmico dos elementos de sua envoltória. Calibrou-se um modelo computacional utilizando-se o software DesignBuilder, para viabilizar futuros estudos por simulações paramétricas; para tanto, foram coletados dados de temperaturas do ar, de globo e superficiais, umidade relativa e velocidade do vento, durante o período de inverno quando aplicadas diferentes rotinas de manipulação das aberturas de ventilação (janelas, bandeiras e combogós), cujos resultados indicaram que o tratamento menos eficaz foi aquele em que todas as aberturas permaneceram fechadas. Para manutenção da neutralidade térmica o melhor tratamento consistiu naquele em que as bandeiras estiveram abertas enquanto os combogós foram mantidos fechados. Durante o dia a sala foi classificada como ligeiramente fria no tratamento em que todas as aberturas estiveram descerradas enquanto o mezanino, ligeiramente quente, para possíveis usuários em pé, realizando atividades domésticas. Coberturas com subsistemas isolantes ou com forros e áticos ventilados são indicadas como medidas corretivas.

Palavras-chave: Índices térmicos, temperaturas superficiais, termopar, DesignBuilder, ambiência

Abstract

The fulfillment of the requirements for shelter and protection from the adverse effects of climate is the guiding principle of most primary architectural forms. The development and commercial availability of new materials and construction technologies have significantly changed the way of thinking about architecture. The enthusiasm, given the range of new constructive alternatives, has induced to the indiscriminate reproduction of architectural proposals adopted in other locations with climatic and cultural peculiarities. This paper analyses the thermal comfort of residence designed for Semiarid area in Paraiba, characterized by the use of cross ventilation for high-ceiling and air vents positioned at different heights relative to the ground. Different comfort indices were used to characterize the indoor environments. We have then proceeded to assess their performance, according to Brazilian standards, and thermal behavior of the elements of its envelopment. A computational model was calibrated using DesignBuilder software, in order to enable further studies by parametric simulations. For this purpose, data were collected from globe, superficial and air temperatures, relative humidity and wind speed during the winter period when applied to different handling routines vent openings (windows, flags and hollow elements). The results indicate the treatment was less effective in that all openings were closed. To maintain thermal neutrality, the best treatment that consisted in which the flags were open while hollow elements were closed. During the day, the treatment in which all openings were unsealed, the room was classified to people standing performing domestic tasks, as slightly cold, while the mezzanine, slightly warm. Covers with insulating subsystems or with ceilings and ventilated attics are indicated as corrective measures.

Keywords: Thermal indices, surface temperatures, thermocouple, DesignBuilder, ambience

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de projetos arquitetônicos que apresentem bom desempenho térmico e, por isso, sejam viáveis do ponto de vista energético, pressupõe, dentre outras coisas, o conhecimento do clima e da topografia local. Projetos climaticamente adequados são capazes de proporcionar conforto térmico aos seus usuários por meio do aproveitamento máximo dos recursos (iluminação, ventilação e outros) provenientes de fontes naturais e consequente uso racional da energia elétrica.

As formas arquitetônicas mais primárias têm por princípio fundamental o atendimento aos requisitos de abrigo e proteção contra os efeitos adversos do clima. Inúmeros exemplos podem ser encontrados na arquitetura vernácula de chalés, iglus, palafitas, zigurates, casas de taipa e outros na qual, além dos princípios bioclimáticos, se utilizam técnicas e materiais construtivos amplamente conhecidos pela população e de grande disponibilidade local; este tipo de arquitetura está marcado por forte caráter regional e cultural e, salvo raras exceções, por espaços internos bastante confortáveis.

Intuitivamente, ou não, a preocupação com o conforto térmico não é nova, há indícios de que, 400 a.C., Hipócrates já havia identificado qualitativamente as variáveis ambientais, embora apenas no século passado tenham sido desenvolvidos métodos capazes de quantificá-las e correlacioná-las ao conforto térmico. Este tema assume maior vulto impulsionado pela Revolução Industrial quando são estabelecidos os vínculos entre ganhos de produtividade, qualidade do ambiente, inclusive térmico, e jornada laboral.

Em paradoxo, porém, é a partir desta revolução que os preceitos defendidos pela arquitetura adaptada ao clima e aos costumes locais passam a ser menos propagados. Na medida em que novos materiais e tecnologias, a exemplo do aço, do vidro, do concreto armado, eram desenvolvidos e disponibilizados no mercado foi-se, aos poucos, divulgando a ideia de uma arquitetura "moderna" capaz de incorporar tais novidades - e assim foram disseminados projetos que, dentre outros princípios, buscavam a integração visual dos espaços internos à paisagem externa, por meio dos painéis envidraçados, faziam uso do concreto aparente e de estruturas mais leves e esbeltas, marcadas por balanços e grandes vãos entre apoios.

O entusiasmo, diante da amplitude das novas alternativas construtivas, induziu à reprodução indiscriminada em outras regiões, de propostas arquitetônicas adotadas com coerência e sucesso em determinada localidade com características climáticas e culturais típicas. Como medida compensatória aos problemas de conforto parcialmente gerados pela inadequação desta arquitetura globalizada recorreu-se, de modo geral, aos sistemas de iluminação e climatização artificial, que vêm, hoje, contribuindo substancialmente para a crise energética mundial.

Como balizadores no processo de tomada de decisões foram elaboradas normas com diretrizes com vista ao desenvolvimento de projetos e/ou especificação de sistemas construtivos; essas normas estabelecem, também, metodologias apropriadas à avaliação do desempenho térmico e energético de edificações, em função dos índices térmicos, das propriedades térmicas dos materiais e das recomendações mínimas adequadas a cada realidade climática específica.

Como exemplo, pode-se citar os conjuntos de normas internacionais da ISO 7730 (ISO, 2005), da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004) e da ASHRAE (ASHRAE, 2005); as cartas bioclimáticas de Baruch Givoni (1976) e Victor Olgay (2008) além do conjunto de normas brasileiras compostas pela NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013).

A NBR 15220 (ABNT, 2005) estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro e propõe diretrizes construtivas para habitações de interesse social enquanto a NBR 15575 (ABNT, 2013) define os requisitos que devem ser contemplados pelos sistemas de vedações verticais internas e externas, tal como pelos subsistemas de cobertura.

Enquanto na teoria as recomendações contidas nas normas ajudam a disseminar, indiretamente, os conceitos de sustentabilidade, adequabilidade climática e eficiência energética no âmbito das habitações destinadas a famílias de baixa renda, visando resguardar um nível mínimo de qualidade ambiental no interior dessas construções, na prática o que se pode observar é a ocupação de amplas áreas do espaço das cidades com projetos urbanísticos nos quais o único critério norteador de planejamento é o melhor aproveitamento do solo em função do maior número de unidades habitacionais por loteamento.

Neste íterim, a célula primária do conjunto habitacional é tratada como casa padrão, destinada a um usuário, também padrão, caracterizado exclusivamente por seu poder aquisitivo e classe social da qual faz parte. Via de regra, cabe a este usuário o dissabor de sobreviver em espaços urbanos monótonos, marcados pelo ritmo e pela impessoalidade e amargar a insatisfação com a qualidade do ambiente térmico, típicos das produções seriadas.

Neste cenário são identificadas semelhanças tanto nas técnicas e materiais construtivos quanto no programa básico de necessidades e na área útil de construção, entre as habitações destinadas ao público de menor renda, de Norte a Sul do Brasil, transpassando a região Semiárida, a despeito de suas particularidades ambientais e socioculturais.

O Semiárido se destaca por sua diversidade climática evidenciada nos períodos de estiagem prolongada, com insuficiência e irregularidade na distribuição de chuvas combinadas com temperaturas elevadas e altas taxas de evaporação; como efeito se verifica, portanto, a constante associação entre Semiárido, pobreza e baixa produtividade.

Quanto à perspectiva socioeconômica, uma das premissas para suplantação da pobreza é o acesso à moradia digna, dotada de infraestrutura básica. O aproveitamento racional de recursos naturais, como ventilação e iluminação, que visa proporcionar ambientes internos menos inóspitos que os externos, configura um incremento a essa dignidade; outra questão, já devidamente estabelecida, é a influência de um ambiente térmico salubre sobre a produtividade.

A edificação, objeto de estudo, implantada no Semiárido paraibano, é uma proposição de redesenho para habitação de interesse social caracterizada pelo diferencial imposto pelas condições climáticas e facilidade de acesso às técnicas e materiais construtivos.

De modo geral, esta unidade residencial, construída no Município de Campina Grande/PB, entre 2012 e 2013, segue o conceito de moradia, adotado pelos programas habitacionais, a exemplo do Minha Casa Minha Vida, e é composta por terraço coberto, sala, cozinha, dois espaços destinados a dormitórios, sendo um no mezanino, banheiro e área de serviço externa. Como sistema construtivo, foram adotadas técnicas tradicionais na região.

O diferencial desta habitação encontra-se na altura interna (pé-direito) elevada e na utilização do recurso da ventilação cruzada, horizontal e vertical, proporcionada pela tipologia de cobertura adotada. A forma final do sistema de cobertura foi definida a partir da necessidade pungente de captação e armazenamento das águas pluviais. É de senso comum que a água, um recurso natural escasso na região semiárida, é de importância vital, especialmente para homens e animais.

A primeira unidade habitacional construída se presta como protótipo, em escala natural, de testes de atendimento dos pré-requisitos estabelecidos e de viabilidade de reprodução em cidades do Semiárido paraibano.

Este estudo é uma iniciativa para avaliação do desempenho térmico dessa edificação a partir da análise do comportamento térmico de ambientes internos e das propriedades térmicas dos materiais empregados em sua envoltória, sobretudo em paredes e cobertura. Para avaliação do comportamento térmico dos ambientes internos foram estabelecidas rotinas para manipulação das aberturas de ventilação: 1) janelas, bandeiras e combogós fechados; 2) bandeiras abertas e combogós fechados; 3) bandeiras abertas e combogós abertos; 4) janelas e bandeiras abertas e combogós fechados e 5) janelas, bandeiras e combogós abertos.

Espera-se que os resultados encontrados nesta pesquisa possam auxiliar na tomada de decisões futuras acerca de possíveis intervenções para melhor adequação do projeto residencial às diversas especificidades climáticas de cidades do Semiárido paraibano.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho e o comportamento térmico da sala e do mezanino da unidade habitacional escolhida, frente aos elementos construtivos e tipologia arquitetônica de sua envoltória, em especial de sua cobertura, e às rotinas pré-estabelecidas de manipulação das aberturas de ventilação.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a influência das rotinas pré-estabelecidas para o uso das aberturas de ventilação sobre a temperatura do ar e umidade relativa interna, durante o período experimental;
- Caracterizar, quanto ao conforto térmico, os ambientes de sala e mezanino, por meio dos índices DI/THI, WBGT, PMV/PPD e PET;
- Analisar o comportamento térmico dos elementos construtivos do envelope (paredes e cobertura) e a influência das propriedades térmicas dos materiais sobre o desempenho térmico da edificação;
- Calibrar um modelo computacional da unidade residencial experimental a fim de viabilizar, em futuro próximo, estudos e testes via simulação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Clima Semiárido Tropical

Um sistema de classificação climática deve levar em conta, simultaneamente, os principais elementos do clima e a diversidade de suas manifestações espaciais (temperatura, precipitação, radiação e vento), de vez que existe uma relação clara entre a precipitação que permanece no solo, as taxas de evaporação, a temperatura do ar e a quantidade de energia incidente sob a superfície (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Mendonça e Danni-Oliveira (2007) afirmam que a existência de simetria entre as faixas de igual temperatura e os paralelos estabeleceram um critério zonal do qual resultaram as zonas climáticas: equatorial, tropical, temperadas, ártica e polar, representadas na Figura 1.

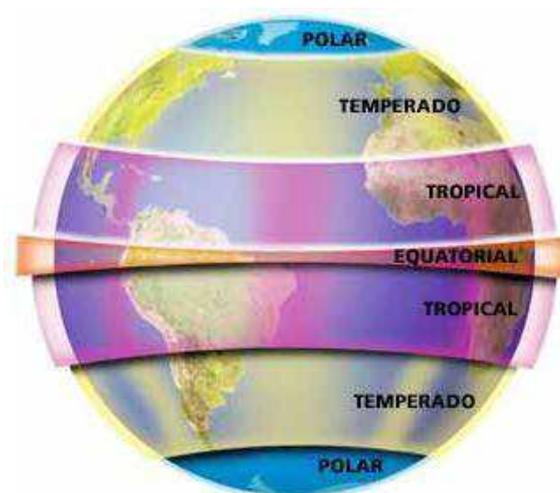


Figura 1- Representação esquemática das principais zonas climáticas terrestres
Fonte: www.geomundo.com.br

Na zona tropical, localizada entre as latitudes $23^{\circ}27'33''\text{N}$ e $23^{\circ}27'33''\text{S}$, a quantidade de insolação recebida é bem maior que na zona temperada e as variações diurnas da temperatura são mais importantes que as variações sazonais. Tais variações são bem definidas em duas estações: verão, período

em que ocorrem as chuvas, e inverno seco com temperaturas mais amenas (AYOADE, 2012).

O clima de semiárido pode ser encontrado tanto nas zonas tropicais como nas temperadas apresentando, nos trópicos, temperaturas médias mais altas que no clima semiárido das médias latitudes (AYOADE, 2012).

O clima semiárido tropical, também conhecido como semiárido de baixas latitudes, é marcado principalmente pelas altas taxas de evaporação, pela baixa média pluviométrica anual, variando de 250 a 750 mm, e pela má distribuição das chuvas ao longo do ano. Outras duas características desse clima são a grande amplitude térmica diária - com contrastes acentuados entre dia e noite - e a acentuada variabilidade pluviométrica interanual (CONTI, 2011).

Ocorre sobremaneira nas áreas correspondentes ao Nordeste brasileiro e à África subsaariana, conforme Figura 2. As vegetações de caatinga e savana seca são típicas, sendo a desertificação climática e/ou ecológica, seus principais problemas ambientais (CONTI, 2011).

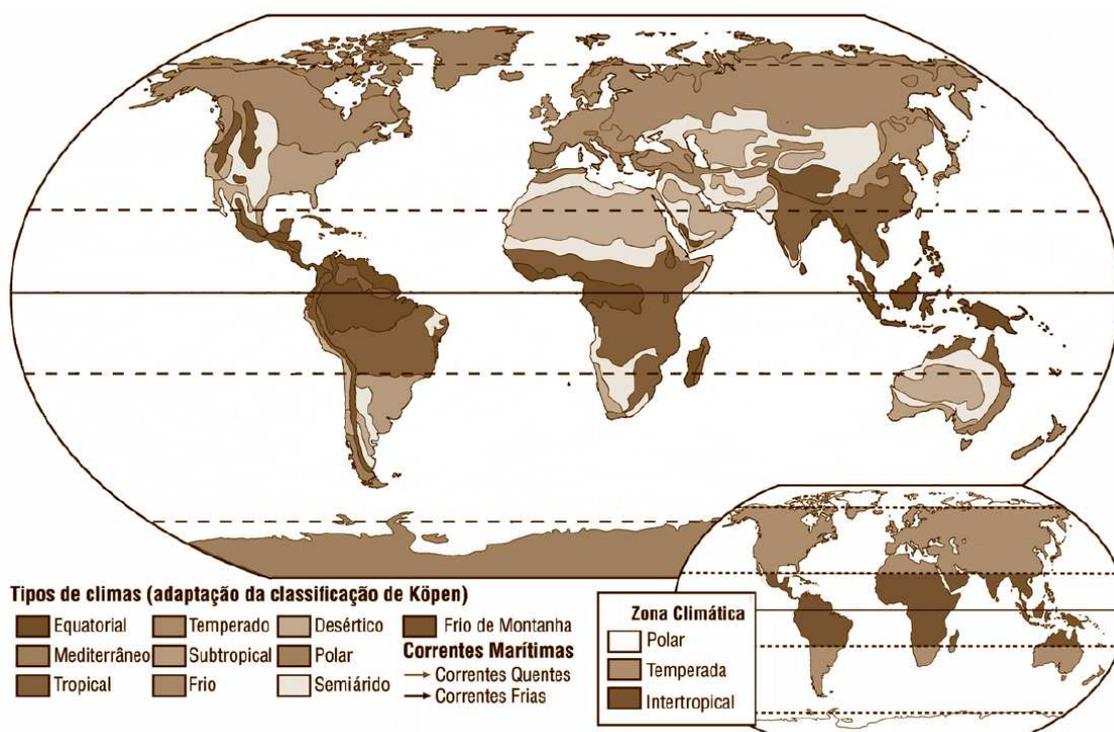


Figura 2- Tipos de climas da Terra
Fonte: IBGE, 2002

2.1.1 Semiárido brasileiro

No Brasil, o clima de semiárido ocorre entre as latitudes 3°S e 20°S, aproximadamente. Abrange grande parte das regiões NE e SE, nas quais ocupa a porção setentrional do estado de Minas Gerais, como observado na Figura 3 e na Tabela 1, sendo a região semiárida mais populosa do mundo, com 20.858.264 habitantes (BRASIL, 2005).



Figura 3- Nova delimitação do Semiárido brasileiro
Fonte: BRASIL, 2005

Tabela 1- Relação dos Estados e número de Municípios integrantes do Semiárido brasileiro (BRASIL, 2005)

Estado	Nº de mun.	Nº de mun.	Mun. da RSA	Área da RSA
	(Total)	(RSA)	(% do Estado)	(% do Estado)
PI	221	127	57,5	59,9
CE	184	150	81,5	86,8
RN	166	147	88,6	93,4
PB	223	170	76,2	86,6
PE	185	122	65,9	88,0
AL	101	38	37,6	45,6
SE	75	29	38,7	50,9
BA	415	265	63,9	69,7
MG	165	85	51,5	51,7

RSA é a Região Semiárida

A nova delimitação da área geográfica de abrangência do Semiárido brasileiro ocorreu em 2005, depois de constatada a inadequação do critério antes adotado que considerava apenas a precipitação pluviométrica média anual dos municípios dessa região.

Para que um município possa integrar a zona do Semiárido é necessário que o mesmo atenda a, no mínimo, um dos seguintes critérios técnicos: a) precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 mm; b) índice de aridez de até 0,5 calculado pelo balanço hídrico que relaciona precipitação e evapotranspiração potencial, no período entre 1961-1990 e c) risco de seca maior que 60%, tomando-se por base o período entre 1970 e 1990 (BRASIL, 2005).

No Semiárido brasileiro as temperaturas médias anuais são da ordem de 26 a 28 °C, com ressalva para as porções de maiores altitudes, que apresentam médias inferiores a 20 °C. Em razão de seu posicionamento geográfico, a área apresenta altas taxas de evapotranspiração que, por sua vez, determinam o déficit hídrico, provocando secas (TROLEIS e SANTOS, 2011).

2.1.2 Semiárido nordestino

Na região Nordeste do Brasil, em especial no Polígono das Secas, se desenvolve um processo de desertificação climática comprovada por meio de inúmeras pesquisas (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Este processo tem como causa as mudanças nos padrões climáticos e, como principais indicadores, a elevação da temperatura média, a redução das precipitações, o agravamento do déficit hídrico dos solos, a queda da produtividade agrícola e a redução demográfica (CONTI, 2011).

A região semiárida nordestina é caracterizada, fundamentalmente, pela ocorrência do bioma caatinga, típico do sertão; pela baixa pluviosidade (as precipitações anuais variam entre 500 e 800 mm havendo, no entanto, bolsões significativos de 400 mm) e por chuvas mal distribuídas no tempo. Um fator natural que influencia nas características climáticas do Nordeste é a proximidade da linha do Equador. As baixas latitudes condicionam a região a

temperaturas elevadas (média de 26 °C), número também elevado de horas de luz solar por ano (estimado em cerca de 3.000) e índices acentuados de evapotranspiração devido à incidência perpendicular dos raios solares sobre a superfície do solo (no Semiárido a taxa de evapotranspiração é de cerca de 2.000 mm.ano⁻¹, em média, podendo atingir cerca de 7 mm.dia⁻¹ em algumas regiões) (SUASSUNA, 2002).

2.1.3 Semiárido paraibano

O território paraibano é dividido em três macrorregiões com características edafoclimáticas e de relevo distintas: a) Planície Atlântica, ocupando o terço leste do Estado; b) Planalto da Borborema, abrangendo sua porção central e c) Sertão, englobando o terço oeste restante (FRANCISCO, 2010).

Segundo Köppen, o clima da macrorregião da Planície Atlântica é do tipo AS' - quente e úmido com chuvas de outono e de inverno; o clima da macrorregião do Planalto da Borborema e de uma pequena porção do nordeste do Sertão é do tipo Bsh - semiárido quente com chuvas de verão enquanto o da macrorregião do Sertão é do tipo Aw' - quente e úmido com chuvas de verão e outono, conforme apresentado na Figura 4.

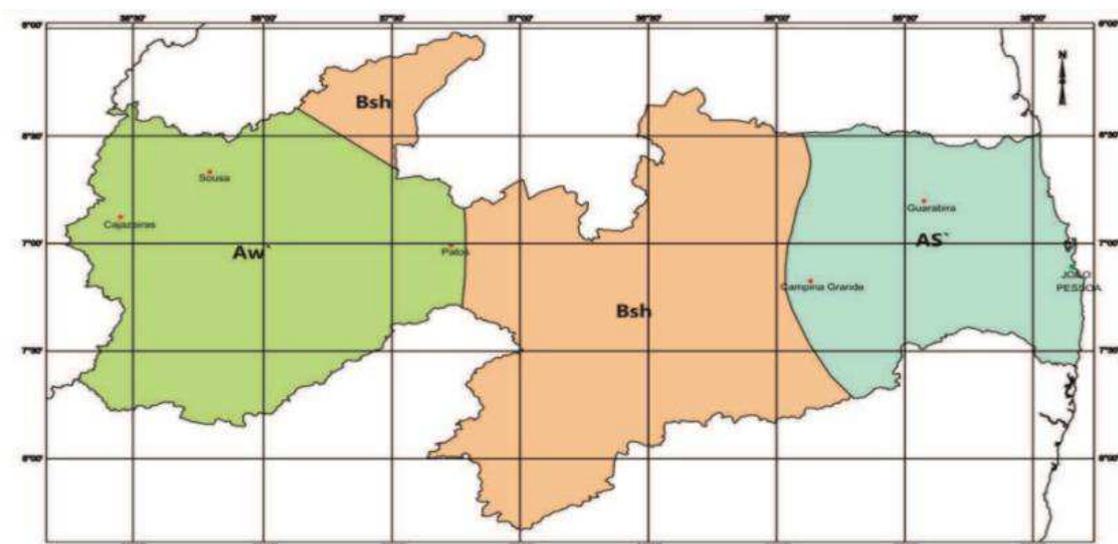


Figura 4- Tipos de clima do Estado da Paraíba, segundo Köppen
Fonte: Atlas Geográfico da Paraíba, 1985

O Estado da Paraíba tem, atualmente, 76,2% de sua área geográfica abarcada pelo clima de semiárido- englobando 170 dos 223 municípios paraibanos e atingindo 57,1% de sua população (BRASIL, 2005).

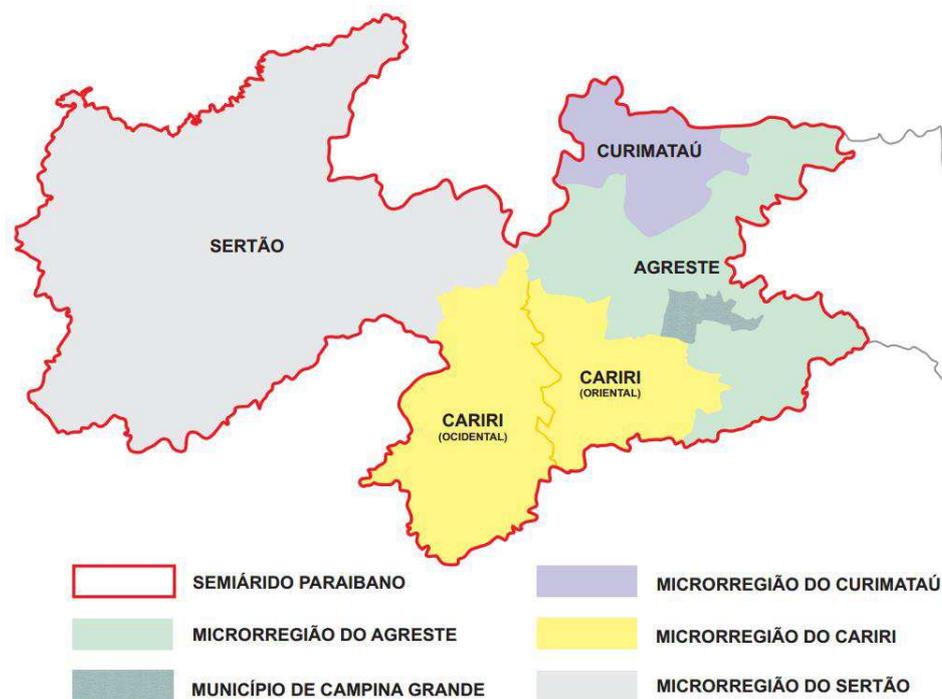


Figura 5- Delimitação do Semiárido paraibano, de suas microrregiões e do Município de Campina Grande

O semiárido paraibano é subdividido nas microrregiões do Agreste, do Curimataú, do Cariri e do Sertão, conforme apresentado na Figura 5. O Agreste é a transição da Mata Atlântica para o Semiárido com trechos quase tão úmidos como no litoral e outros secos como no Sertão, com período mais chuvoso nos meses de abril a julho. O Curimataú é caracterizado por apresentar altas temperaturas no verão e muito baixas no inverno. O Cariri apresenta curta estação chuvosa, com precipitação média de 300 mm anuais, estação seca prolongada (maior que oito meses) e umidade relativa do ar em torno de 65%. O Sertão é caracterizado por baixa pluviosidade, entre 500 mm e 800 mm anuais. Nessas últimas três microrregiões a pluviosidade é maior no período compreendido entre os meses de fevereiro e maio (SILVA et al., 2008).

O município de Campina Grande, segunda cidade mais desenvolvida do estado, está localizado na microrregião do Agreste, distante 112 km da capital, João Pessoa. Neste município as temperaturas máximas do ar atingem o patamar dos 30 °C e as mínimas chegam a 18 °C. Como está localizada no

Planalto da Borborema, a uma altitude de mais de 500 m, suas temperaturas máximas e mínimas são mais baixas quando comparadas com as da capital paraibana. Segundo Romero (2000), a altitude é um dos fatores que exercem maior influência sobre a temperatura promovendo decréscimo de 1 °C para cada 200 m de altura relativa a nível do mar; já a grande amplitude térmica de 12 °C pode ser explicada pela distância que separa o município em questão das massas d'água oceânicas. Romero (2000) afirma que as grandes massas d'água possuem efeito estabilizador pronunciado, reduzindo as variações das temperaturas diurnas e estacionais e, conseqüentemente, diminuindo a amplitude térmica.

É importante salientar que as microrregiões sul e oeste do município de Campina Grande apresentam características distintas das demais uma vez que são dominadas pelo clima e vegetação do Cariri paraibano, com extensas áreas de clima seco e vegetação de Caatinga. No Cariri paraibano os índices de aridez¹ podem variar entre 0,14 (clima árido) e 0,22 (clima semiárido), para o cariri oriental e ocidental, respectivamente, conforme classificação de Nascimento e Alves (2008)².

2.2 Conforto térmico

Questões acerca do conforto térmico vêm sendo elaboradas há muito tempo. Hipócrates, em 400 a.C., já havia identificado, qualitativamente, algumas de suas variáveis mais influentes: as ambientais. Tem-se registro de que as primeiras medições de temperatura do ar foram realizadas em meados do séc. XVII, nas cidades de Florença e Pequim. No séc. XIX já se vinculava o estresse térmico a problemas de saúde em trabalhadores de minas e da indústria têxtil. No entanto, apenas no século passado foram criados métodos capazes de medir as variáveis e correlacioná-las com o conforto térmico (MONTEIRO e ALUCCI, 2007).

¹ O grau de aridez depende da razão entre os índices pluviométricos e as perdas por evaporação e transpiração sendo que, quanto menor esta razão maior o índice de aridez.

² Para as áreas de aplicação da Convenção das Nações Unidas sobre Desertificação (UNESCO, 1977) o índice de aridez varia de 0,21 até 0,65.

Existem inúmeras definições para conforto térmico; no entanto, são comuns abordagens vagas que indicam que o tema envolve questões subjetivas de percepção.

Tanto a ASHRAE (ASHRAE, 2005) como a ISO 7730 (ISO, 2005) definem a expressão como um estado da mente que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Na NBR 15220:1 (ABNT, 2005) consta que conforto térmico é a satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente ocorrendo quando não há desconforto por frio ou por calor.

A ASHRAE (ASHRAE, 2005) enfatiza que, para existir sensação de conforto térmico é imprescindível o atendimento de duas exigências: a) o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo deve ser nulo e b) a temperatura da pele e do suor devem permanecer dentro de certos limites.

As normas citadas acima tomaram por base o conceito de neutralidade térmica elaborado por Fanger (1972), a partir de estudos realizados em câmaras climáticas, nos anos 60; trata-se do estado físico em que a densidade do fluxo de calor entre o corpo humano e o ambiente é igual à taxa metabólica do corpo, desde que a temperatura corporal seja constante. Com base nos resultados obtidos, este autor inferiu que a satisfação humana, relativa ao ambiente térmico, é constatada se verifica através do equilíbrio entre o conjunto interativo das variáveis ambientais e a produção interna de calor pelo organismo.

Para Nicol (1993), e face à complexidade do assunto, a compreensão do conforto térmico deve estar fundamentada no estudo dos processos internos pelos quais as pessoas produzem e respondem ao calor; dos sentimentos conscientes das pessoas sobre o ambiente; dos processos de transferência de calor entre o homem e o ambiente e dos fatores socioculturais que determinam a maneira como as pessoas reagem ao ambiente ao seu redor.

Um estudo quantitativo da influência do ambiente térmico sobre o corpo humano requer medições das variáveis ambientais, das reações humanas diante dessas variáveis e buscar expressar a relação entre causa e efeito com o emprego de um único valor numérico (SORANO, 2009).

Os elementos básicos do ambiente térmico - temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade absoluta e movimento do ar, podem facilmente ser medidos e seus efeitos combinados com a carga térmica e a restrição evaporativa, calculados por um único observador usando instrumentos simples e baratos, além de procedimentos estabelecidos há muito tempo. Referidos procedimentos permitem uma avaliação equilibrada e abrangente do estresse térmico e das maneiras como ele pode ser suavizado (BUDD, 2008).

Além das variáveis ambientais a atividade física e a vestimenta também interagem na sensação de conforto térmico humano pois, quanto mais intensa for essa atividade maior será o calor gerado por metabolismo e quanto maior a resistência das roupas maior também a dificuldade do corpo humano se livrar do calor por ele produzido. Valores de taxa metabólica em função de algumas atividades físicas e dos índices de isolamento de alguns tipos de vestuário são facilmente conseguidos através de consulta às normas ASHRAE e/ou ISO 7730 (LAMBERTS et al., 1997a).

2.2.1 Clima e Tempo x Homem x Edificação

A relação entre “ambiente natural x homem x ambiente construído” foi dissecada em obras clássicas de autores como: Fanger, Baruch Givoni e Victor Olgay, em 1972, 1976 e 2008, respectivamente.

De acordo com Olgay (2008), os efeitos do meio ambiente incidem diretamente tanto no vigor como na saúde humana, fato conhecido já que em zonas climáticas onde prevalece o calor ou o frio excessivo, o esforço biológico de adaptação a estas condições diminuem a energia do homem. Desta forma, tanto sua força física como sua atividade mental se desenvolvem melhor se as condições climáticas do entorno oscilam dentro de uma faixa determinada; fora deste limite a eficácia humana decresce e as tensões e as possibilidades de contrair doenças aumentam.

Normalmente, tais reações adversas são evitadas por meio das respostas comportamentais humanas. Em resposta a dicas subjetivas de desconforto térmico ou tensão percebida o ser humano busca automaticamente

reduzir as cargas de calor metabólico e ambiental diminuindo o ritmo de trabalho, fugindo da radiação solar direta, procurando uma brisa e folgando sua roupa, a fim de favorecer a evaporação. Desta forma, o homem tenta manter um balanço entre as demandas da tarefa somadas às cargas térmicas ambientais e à capacidade do seu corpo de lidar com elas (BUDD, 2008).

Para que a dissipação de calor se processe regular e integradamente com as variações do meio externo, o ser humano conta com o sistema termorregulador de seu organismo e recorre a outros dois meios de controle: ao uso adequado da vestimenta e à criação de um invólucro climaticamente equilibrado (ROMERO, 2000).

2.2.1.1 Sistema termorregulador humano

Este sistema é responsável pela manutenção da temperatura dos tecidos centrais do corpo dentro de um intervalo estreito, independentemente das amplas variações relativas no ambiente externo (GIVONI, 1976).

Por ser um animal homeotérmico, o homem recorre à termorregulação para manter a temperatura de seu núcleo corporal sensivelmente constante, na ordem dos 37 °C, com limites muito estreitos- entre 36,1 e 37,2 °C- sendo 32 °C o limite inferior e 42 °C o limite superior para sobrevivência, em estado de enfermidade (FROTA e SCHIFFER, 2001).

Pode-se dizer, então, que o ser humano não é um elemento passivo em relação ao ambiente visto que se utiliza de dois mecanismos de regulação térmica para responder às exigências externas: um de caráter fisiológico - suor, variações dos batimentos cardíacos, da frequência respiratória, do diâmetro dos vasos e do fluxo sanguíneo, contração muscular e pilo-ereção e o outro de caráter comportamental - sono, prostração, redução da capacidade de trabalho (ROMERO, 2000).

Como a temperatura interna do organismo deve ser mantida constante quando o meio apresenta condições térmicas inadequadas, o sistema termorregulador do homem é ativado reduzindo ou aumentando as perdas de calor pelo organismo, através de alguns mecanismos de controle, como reação ao frio e ao calor. Devido à alta temperatura do meio existem, no calor,

dificuldades para eliminação do calor corporal dando origem à vasodilatação que provoca aumento de volume de sangue dentro das veias acelerando o ritmo cardíaco e provocando a transpiração. No frio a dificuldade para manter o calor, em virtude da baixa temperatura do meio, origina a vasoconstrição que diminui o volume sanguíneo bombeado e o ritmo cardíaco. O corpo recorre a artifícios, como o arrepio e o tiritar, para geração de calor (LAMBERTS et al., 2005).

Em busca do equilíbrio térmico o corpo humano realiza diversos processos de troca de calor - por condução, por convecção, por radiação e por evaporação - com o meio ao seu redor. Estima-se que o corpo humano perde 40% de seu calor através da radiação, 40% por convecção e apenas 20% por evaporação podendo essas proporções sofrer alterações em função de variações das condições térmicas (OLGYAY, 2008).

A troca por condução está relacionada à temperatura das superfícies enquanto a troca por convecção, com a temperatura e a velocidade do ar. A troca por radiação depende da temperatura radiante média que é resultante do efeito da radiação solar - direta e difusa - e da radiação emitida por objetos e demais superfícies aquecidas. A troca por evaporação depende da pressão do vapor e da velocidade do ar (ROMERO, 2000).

Para Xavier (2000), as perdas de calor pela respiração e pela pele envolvem trocas secas e úmidas. As perdas de calor pela respiração ocorrem por convecção e evaporação sendo importante conhecer as variáveis: temperatura e umidade relativa do ar ou pressão parcial do vapor de água. As perdas de calor pela pele são por meio da convecção e da radiação; além da evaporação e difusão do suor, sendo importante conhecer as seguintes variáveis: temperatura do ar, temperatura radiante média e isolamento das roupas; taxa metabólica e umidade relativa do ar, respectivamente.

2.2.1.2 O uso adequado da vestimenta

A evaporação e a difusão de suor não restritas permitem pessoas saudáveis enfrentar, sem efeito doentio ou mesmo desconforto evidente, temperaturas do ar de 100 °C em saunas, de 50 °C em desertos e mais de 1kW

de calor metabólico em exercícios extenuantes mas, quando a evaporação é muito limitada - especificamente por vestimentas, altas umidades ou baixa movimentação do ar, para dissipar as cargas de calor metabólico e do ambiente, então o calor se acumula no corpo (BUDD, 2008).

A vestimenta representa uma barreira para as trocas de calor por convecção e evaporação e diminui a sensibilidade do corpo às variações de temperatura e de velocidade do ar. Funciona como isolante térmico mantendo, junto ao corpo, uma camada mais ou menos aquecida, conforme material usado em sua confecção, seu ajuste e porção do corpo que cobre (LAMBERTS et al., 2005).

O uso de vestimentas adequadas influencia na sensação de conforto visto que reduz o ganho de calor advindo da radiação solar direta, restringe as perdas em condições de baixa umidade do ar e minora o efeito refrescante do suor em evaporação.

2.2.1.3 Invólucro climaticamente equilibrado

O edifício é uma imposição da necessidade de conservação da vida e da manutenção do estado saudável; serve de abrigo para o homem protegendo-o do clima e dos males do tempo (IVANÓSKI, 2004).

O invólucro é o principal instrumento que nos permite satisfazer as exigências de conforto adequadas. Modifica o entorno natural e nos aproxima das condições ótimas de habitação filtrando, absorvendo ou repelindo os elementos do meio ambiente, segundo influenciem positiva ou negativamente no conforto do ser humano. Condições de conforto podem ser criadas por meio da manipulação dos espaços do edifício, dos elementos de fachada, dos materiais empregados, da forma e da orientação em função da trajetória solar e da direção dos ventos predominantes (OLGYAY, 2008).

Em virtude disto, a edificação deve ser pensada de maneira a incorporar estratégias da arquitetura bioclimática que favoreçam o melhor aproveitamento dos recursos naturais, assim como a empregar os materiais construtivos mais adequados, com o uso intensivo da inércia e do isolamento térmico a fim de

evitar ganhos de calor excessivos no verão e reduzir as perdas no inverno (BATISTA e LAMBERTS, 2010).

A NBR 15220:3 (ABNT, 2005) estabelece um Zoneamento Bioclimático Brasileiro abrangendo um conjunto de recomendações e estratégias construtivas, específicas para cada uma das oito zonas, destinadas às habitações unifamiliares de interesse social. Nessas diretrizes são considerados os seguintes parâmetros: tamanho das aberturas para ventilação, proteção das aberturas, características das vedações externas (paredes e cobertura), segundo as propriedades dos materiais utilizados e estratégias de condicionamento passivo.

2.2.2 Variáveis do conforto térmico

Segundo Fanger (1972), a produção de calor pelo organismo está associada à taxa metabólica em função da atividade desempenhada pelo indivíduo enquanto os ganhos e as perdas estão relacionados aos diferentes mecanismos de trocas através da respiração e da pele, que são afetadas diretamente pelas variáveis ambientais e restringidas pela vestimenta.

Sendo assim, as variáveis que interferem nas condições de conforto são classificadas em: a) ambientais ou físicas: temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade do ar, velocidade do vento e b) pessoais ou individuais: atividade desempenhada e isolamento térmico da vestimenta (FANGER, 1972).

Esta classificação é constantemente adotada em diversos estudos atuais sobre conforto térmico.

2.2.2.1 Variáveis ambientais

Para Lamberts e Xavier (2002), as variáveis ambientais relacionadas aos cálculos analíticos do conforto térmico, que podem ser facilmente extraídas do meio, são a temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade do ar e velocidade do ar.

No conjunto dessas variáveis denominadas ambientais, estão incluídas as variáveis climáticas e as meteorológicas; o que difere uma da outra é sua relação com o clima e o tempo, respectivamente.

Lamberts et al. (1997) tratam a diferença entre clima e tempo afirmando que clima é a condição média do tempo em uma região, baseada em medições feitas em período de no mínimo 30 anos enquanto tempo é a variação diária das condições atmosféricas.

Radiação solar:

O Sol é a principal fonte de energia (de calor e de luz) para o planeta. A energia transmitida pelo Sol na forma de ondas eletromagnéticas é chamada radiação solar (ROMERO, 2000).

A radiação solar pode ser dividida em radiação direta e difusa sendo a direta a parcela que atinge diretamente a Terra e a indireta aquela que, ao incidir na atmosfera terrestre, sofre um espalhamento, tendo sua direção alterada. A intensidade da radiação direta que atinge a superfície terrestre depende da elevação solar e do ângulo de incidência dos raios solares em relação à superfície receptora. Já a intensidade da parcela difusa está diretamente relacionada à condição de céu (LAMBERTS et al., 1997).

Quanto menor a elevação solar menor também a radiação incidente sobre a superfície terrestre. A altura do Sol é determinada pela latitude do local, pelo período do dia e pela estação do ano. É menor para maiores latitudes; mais baixa pela manhã e ao entardecer e mais elevada à tarde; maior no verão que no inverno (AYOADE, 2012).

A condição de céu é definida em função da transmitância da atmosfera com relação às nuvens e da pureza do ar quanto à poeira, dióxido de carbono e vapor d'água (ROMERO, 2000).

A radiação, direta e difusa, pode ser absorvida e refletida pelas superfícies opacas sobre as quais incide sendo que tanto a parcela da energia absorvida quanto a da refletida dependem da cor e de outras características da superfície, como composição química, grau de umidade etc.

A afirmação anterior se aplica não apenas às superfícies de terreno, mas também às do envelope construtivo. No que se refere às superfícies

transparentes seu comportamento é distinto ao das opacas, uma vez que permitem a transmissão de grande parcela da radiação incidente sobre ela.

Segundo Lamberts et al. (2005), a parcela da radiação transmitida para o interior da edificação influencia instantaneamente nas condições de conforto, por ser responsável pela principal fração dos ganhos térmicos do ambiente.

Temperatura do ar (t_{ar}):

Esta variável é considerada nos estudos de conforto térmico para determinação das trocas térmicas por convecção entre as pessoas e o ambiente ao seu redor (XAVIER, 2000).

A relação entre as taxas de aquecimento e esfriamento da superfície da terra é o fator determinante da temperatura do ar (ROMERO, 2000).

De acordo com Ayoade (2012), entre os vários fatores que influenciam a distribuição da temperatura do ar sobre a superfície terrestre ou parte dela estão:

- A latitude do local e a transmitância atmosférica - que exercem influência na quantidade de insolação recebida pelas superfícies. Desta forma, quanto maior a latitude do local, normalmente menores serão as temperaturas do ar e, quanto menor a quantidade de nuvens e de poluição atmosférica, maiores as temperaturas do ar nas camadas mais próximas da superfície terrestre;
- A natureza da superfície - que determina os valores de albedo e de calor específico. Albedos elevados significam maior quantidade de radiação refletida e, por conseguinte, menores temperaturas superficiais; da mesma forma, superfícies com alto calor específico necessitam absorver mais energia para elevar sua temperatura;
- A distância das grandes massas d'água - pelo efeito amenizador das temperaturas extremas diurnas e sazonais de seu entorno mais próximo que refletem na diminuição das amplitudes térmicas anuais em localidades litorâneas;
- O relevo do local - uma vez que a temperatura do ar diminui com a altitude crescente a uma taxa de 0,6 °C por 100 metros. Localidades

situadas a barlavento e a sotavento de uma mesma montanha podem possuir grandes diferenças de temperatura devido a diferente exposição às correntes de ar;

- Os ventos predominantes e as correntes oceânicas - uma vez que por advecção podem aquecer ou resfriar um local, dependendo das características térmicas junto à área que influenciam.

Ao nível da edificação a temperatura do ar (t_{ar}) é resultado da combinação do comportamento térmico da envoltória em função das propriedades térmicas dos materiais com os quais foram confeccionados elementos de vedação, da umidade e da ventilação.

A zona de conforto para que se mantenha o equilíbrio térmico em função da temperatura do ar (t_{ar}), para pessoas vestidas com roupas normais de trabalho, desempenhando atividades sedentárias, se situa entre 23 e 27 °C. Esta variável pode ser medida com auxílio de sensores de expansão de líquidos ou sólidos, termômetros elétricos e de sensores de resistência variável (termopares) (XAVIER, 2000).

Temperatura radiante média (t_{rm}):

Temperatura radiante média (t_{rm}), segundo definição constante na NBR 15220:1 (ABNT, 2005), é a “temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor do corpo humano por radiação é igual à troca de calor por radiação no ambiente real não uniforme”.

Pode ser medida utilizando-se um termômetro de globo negro, um radiômetro de duas esferas ou através das temperaturas das superfícies ao redor do corpo humano, sendo o termômetro de globo negro o dispositivo mais usual na determinação desta variável (XAVIER, 2000).

As expressões que permitem o cálculo da temperatura radiante média (t_{rm}) consideram a existência de convecção natural ou de convecção forçada; a primeira usa dados de temperaturas do ar e de globo negro enquanto a segunda necessita também de dados de velocidade do ar, ao nível do globo.

Umidade do ar:

A presença de vapor d'água no ar tem origem principalmente na evaporação natural da água e na transpiração dos vegetais.

A existência de vapor de água na atmosfera é tratada como umidade. Umidade absoluta, umidade relativa e pressão de vapor são apenas algumas das diferentes formas de expressão da quantidade de vapor d'água.

Segundo a NBR 15220:1 (ABNT, 2005), a umidade absoluta (UA) é o quociente da massa de vapor d'água pela massa de ar seco (g.kg^{-1}) e a umidade relativa (UR), o quociente da umidade absoluta do ar pela umidade absoluta do ar saturado para a mesma temperatura e pressão atmosférica (%).

Para Romero (2000), a pressão de vapor do ar (p_a) é a parte da pressão atmosférica que é devida ao vapor d'água (mm.Hg^{-1}).

O vapor d'água, além de ser a origem de todas as formas de condensação e precipitação, exerce grande efeito sobre a temperatura do ar por absorver as radiações solar e terrestre. Contém calor latente, que é liberado quando o vapor se condensa, alimentando as circulações e perturbações atmosféricas. Influencia as taxas de evapotranspiração interferindo na sensação térmica e, em consequência, no conforto térmico (AYOADE, 2012).

De acordo com Ayoade (2012), a umidade relativa é a medida de umidade do ar mais usada por ser facilmente obtida e calculada, usando-se termômetros de mercúrio, de bulbo seco e de bulbo úmido. Atinge seu valor mínimo à tarde, durante a estação seca, nos interiores continentais dos trópicos. Quanto menor a latitude, menores também as variações sazonais nos valores da umidade relativa.

A umidade relativa é de grande importância quando se trata de amplitude térmica diária. Isto equivale a dizer que quanto mais seco for o clima, mais acentuadas serão suas temperaturas extremas (mínimas e máximas) (FROTA e SCHIFFER, 2001).

Recomenda-se que a umidade relativa do ar varie entre os limites de 30% e 70%, para que sejam minimizadas as ocorrências de sensações desagradáveis por excesso de suor ou por pele ressecada, de proliferação de microrganismos e de deficiências respiratórias (LAMBERTS e XAVIER, 2002).

Velocidade do vento:

O movimento do ar é resultado das diferenças de pressão atmosférica verificadas pela influência direta da temperatura do ar. A diferença de pressão ou de temperatura entre dois pontos da atmosfera gera um fluxo de ar que se desloca das regiões mais frias (maior pressão) para as regiões mais quentes (menor pressão). Dos fatores locais que intervêm na formação do movimento do ar o relevo exerce um papel fundamental uma vez que desvia, altera ou canaliza este movimento. Neste caso, quanto mais rugoso o solo maior o atrito e menor a velocidade do ar próxima à superfície sendo, geralmente, mais baixa na cidade que em locais abertos (ROMERO, 2000).

Ao nível da edificação o vento é muito importante não somente por razões de conforto térmico, mas também para manutenção da salubridade visto que auxilia na remoção da umidade e no resfriamento do local.

O conforto humano é afetado pela velocidade do vento e seu comportamento flutuante, variações no tempo e no espaço, que exigem uma adaptação quase instantânea do indivíduo (BARROSO-KRAUSE et al., 2005).

Os equipamentos mais usuais para medição de velocidade do vento são os anemômetros de fio quente, direcionais, e os anemômetros de esfera aquecida, omnidirecionais (XAVIER, 2000); são comuns também os anemômetros de concha ou de hélice.

No caso de ausência de dados de velocidade de vento coletados por instrumentos pode-se utilizar a Escala Beaufort de Ventos (BARROSO-KRAUSE et al., 2005), desenhada no início do séc. XIX pelo integrante da Marinha Inglesa, Sir Francis Beaufort. Com esta escala apresentada na Tabela 2, Beaufort classificou os ventos de acordo com sua velocidade e poder de destruição.

Tabela 2- Escala Beaufort de Ventos (BARROSO-KRAUSE, 2005)

Grau	m.s ⁻¹	Designação	Efeitos em terra
0	0 a 0,2	Calmo	Fumaça sobe na vertical
1	0,3 a 1,5	Aragem	Fumaça indica direção do vento
2	1,6 a 3,3	Brisa leve	Movimentação das folhas das árvores e de moinhos
3	3,4 a 5,4	Brisa fraca	Agitação de folhas das árvores e bandeiras

4	5,5 a 7,9	Brisa moderada	Poeira e pequenos papéis são levantados, movimentação dos galhos das árvores
5	8,0 a 10,7	Brisa forte	Movimentação de grandes galhos e árvores pequenas
6	10,8 a 13,8	Vento fresco	Movimentação dos ramos das árvores, dificuldade de usar guarda-chuvas
7	13,9 a 17,1	Vento forte	Movimentação de árvores grandes, dificuldade de andar contra o vento
8	17,2 a 20,7	Ventania	Desprendimento de galhos das árvores, dificuldade de andar contra o vento
9	20,8 a 24,4	Ventania forte	Danos em pequenas construções, impossibilidade de andar contra o vento
10	24,5 a 28,4	Tempestade	Árvores arrancadas, danos estruturais em construções

A NR 17 (BRASIL, 1990) estabelece velocidade do ar máxima de $0,75 \text{ m.s}^{-1}$ para ambientes nos quais são desenvolvidas atividades que exijam solicitação intelectual e atenção constantes (atividades leves com taxa metabólica de 70 W.m^{-2}). A ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004) define, para as mesmas condições, velocidades máximas do ar de $0,15 \text{ m.s}^{-1}$ no inverno e $0,80 \text{ m.s}^{-1}$ no verão.

2.2.2.2 Variáveis arquitetônicas

As variáveis arquitetônicas que interagem com o meio ambiente e com o homem, são: a forma, a função, os tipos de fechamento (opacos ou transparentes) e os sistemas de iluminação e condicionamento artificial (LAMBERTS et al., 1997).

Vários estudos vinculam o conforto térmico à forma arquitetônica. Existe uma nítida correlação entre as zonas climáticas e os locais nos quais se encontram determinadas tipologias de configuração do assentamento urbano, de cobertura, de proporção entre vazios e maciços etc. Apesar de aparentemente contrastantes e diversas, as mais variadas formas arquitetônicas possuem, em comum, a busca por atender às exigências do clima e aos requisitos do conforto térmico (OLGYAY, 2008).

Quanto à função, é notório que um mesmo projeto arquitetônico, se utilizado para fins diferenciados, pode mostrar-se mais eficiente termicamente para determinado uso, em detrimento de outro. Para exemplificar pode-se

analisar uma situação hipotética: uma edificação projetada para funcionar exclusivamente nos períodos matutino e vespertino e que, posteriormente, passa a ser usada para abrigar atividades noturnas.

Os tipos de fechamento, se transparentes ou opacos, influenciam diretamente sobre as cargas térmicas do ambiente interno. Os opacos barrando e/ou retardando os efeitos da exposição superficial à radiação solar e os transparentes permitindo que a mesma adentre o recinto quase que integral e instantaneamente e lá permaneça mais tempo - o conhecido efeito estufa.

Os sistemas de iluminação, tal como os de condicionamento artificial, contribuem para a composição da carga térmica total do ambiente interno podendo ser mais ou menos eficientes quanto à utilização racional da energia elétrica. No caso do sistema de condicionamento artificial é oportuno que seja calculado o balanço entre as cargas de calor geradas pelo sistema e as reduções ocasionadas pelo seu funcionamento.

2.2.2.3 Variáveis humanas

2.2.2.3.1 Mensuráveis

As variáveis humanas mensuráveis que influenciam no conforto térmico são: metabolismo gerado pela atividade física (taxa metabólica) e a resistência térmica oferecida pelas vestimentas (isolamento do vestuário).

Metabolismo gerado pela atividade física (M):

É por meio do metabolismo que o organismo humano produz energia a partir de elementos combustíveis orgânicos. De toda esta energia produzida apenas 20% são transformados em potencialidade de trabalho. Os 80% restantes são transformados em calor, que deve ser dissipado para que a temperatura interna do organismo seja mantida em equilíbrio (FROTA e SCHIFFER, 2001; LAMBERTS et al., 2005).

Segundo Givoni (1976), a produção de calor metabólico é proporcional à intensidade da atividade física embora seja influenciada pelas condições

ambientais e incrementada pelo estresse térmico (por frio ou por calor). Com o aumento na taxa metabólica mais oxigênio é requerido pelos músculos trabalhados e maior quantidade de calor tem que ser transferida do núcleo corporal para a pele e, posteriormente, para o ambiente. Dentre as respostas fisiológicas a frequência cardíaca e a temperatura interna corporal são mais sensíveis ao estresse metabólico enquanto a temperatura da pele responde mais às cargas de calor ambiental.

Assim, as taxas metabólicas estão relacionadas às atividades físicas desempenhadas, conforme indicado na Tabela 3; o metabolismo pode ser expresso em $W.m^{-2}$ de pele ou em met, unidade do metabolismo correspondente a uma pessoa sentada e relaxada, sendo assim, 1 met é igual a $58,2 W.m^{-2}$ de área superficial.

Tabela 3- Taxa metabólica para diversas atividades, segundo a ISO 7730 (ISO, 2005)

Atividade desempenhada	Taxa metabólica	
	em $W.m^{-2}$	em met
Reclinado	46	0,8
Sentado, relaxado	58	1,0
Atividade sedentária (em escritório, escola, laboratório)	70	1,2
Atividades leves, em pé (fazendo compras, em laboratórios, indústrias leves)	93	1,6
Atividades médias em pé (como vendedora, trabalhos domésticos, operadores de máquinas)	116	2,0
Caminhando em local plano a $2 km.h^{-1}$	110	1,9
Caminhando em local plano a $3 km.h^{-1}$	140	2,4
Caminhando em local plano a $4 km.h^{-1}$	165	2,8
Caminhando em local plano a $5 km.h^{-1}$	200	3,4

Resistência térmica oferecida pelas vestimentas (I_{cl}):

A resistência térmica das vestimentas é descrita como o isolamento intrínseco da pele para a superfície externa das roupas desconsiderando-se a resistência fornecida pela camada de ar ao redor do corpo. É representada por " I_{cl} ", expresso em $m^2.K.W^{-1}$ ou em "clo", em que 1 clo corresponde a $0,155 m^2.K.W^{-1}$ (XAVIER, 2000).

As roupas servem como barreira para as trocas de calor por convecção e por radiação entre o corpo e o ambiente circundante, interferindo ainda na

evaporação do suor. Em temperaturas do ar abaixo de 35 °C provocam redução das trocas secas produzindo um efeito de aquecimento. Em temperaturas do ar acima de 35 °C reduzem o ganho de calor seco e a velocidade do ar sobre a pele, aumentam a umidade reduzindo, conseqüentemente, o efeito refrescante ocasionado pela evaporação do suor a partir da pele (GIVONI, 1976).

O isolamento do vestuário depende da resistência térmica de seus tecidos (função do material usado para sua confecção), de sua rigidez (função da espessura do material) e de sua modelagem (função da renovação da camada de ar existente entre a pele e a roupa).

Quando o homem está exposto à radiação solar a roupa sempre minora as cargas de calor radiante. Se a umidade é baixa e o usuário está em repouso, a roupa sempre reduz a carga de calor. Entretanto, quando a umidade é alta e a evaporação é restringida ou na prática de atividade física (por lazer ou laboral), quando a taxa de suor é aumentada, pode provocar maiores efeitos fisiológicos adversos (GIVONI, 1976).

A ISO 7730 (ISO, 2005) define que o índice de resistência térmica (I), para a vestimenta completa de uma pessoa será dado pelo somatório do isolamento térmico referente a cada peça do vestuário (I_{cl}), separadamente, conforme dados constantes da Tabela 04.

Tabela 4- Isolamento térmico para peças de vestuário, segundo a ISO 7730 (ISO, 2005)

Vestuário	I_{cl}	
	$m^2.K.W^{-1}$	clo
Calcinha	0,03	0,005
Calcinha e sutiã	0,03	0,005
Cuecão longo	0,10	0,016
Camisa de baixo	0,09	0,014
Camisa de baixo com mangas longas	0,12	0,019
Camisa manga curta	0,15	0,023
Camisa fina manga longa	0,20	0,031
Camisa manga longa	0,25	0,039
Camisa flanelada manga longa	0,30	0,047
Blusa manga longa	0,15	0,023
Calça curta	0,06	0,009
Calça fina	0,20	0,031
Calça média	0,25	0,039
Calça flanelada	0,28	0,043
Saia leve (verão)	0,15	0,023

Saia grossa (inverno)	0,25	0,039
Vestido leve de manga curta	0,20	0,031
Vestido grosso de manga longa	0,55	0,085
Jaqueta	0,35	0,062
Meia fina	0,03	0,005
Meia grossa	0,05	0,008
Meia calça	0,10	0,016
Sapato	0,04	0,006

2.2.2.3.2 Subjetivas

Para Schmid (2005), Mascarello (2005) e Corbella e Corner (2011) existem outras variáveis relativas ao usuário, as quais foram desconsideradas por Fanger (1972). Essas variáveis, denominadas subjetivas, são caracterizadas pela não mensurabilidade e pelo vínculo às questões socioculturais. O nível de estresse, o grau de adaptabilidade climática do indivíduo, suas preferências térmicas, seu modo de vestir, seu tipo de alimentação e suas experiências anteriores, são algumas citadas pelos autores.

2.2.3 Índices para caracterização do ambiente térmico

Os índices de conforto foram desenvolvidos frente à necessidade de caracterização do ambiente em função da interação combinada das diversas variáveis atuantes na sensação térmica, saúde e produtividade humana. Esses índices servem como parâmetros para avaliação pós-ocupacional em termos das condições de conforto que oferecem. Subsidiaram propostas de adaptação para adequação de espaços arquitetônicos e urbanos às necessidades humanas (RUAS, 2001; BUDD, 2008).

Budd (2008) elencou algumas questões que podem induzir a erros de aplicação e medição, tais como:

- Utilização de determinados índices desconsiderando os ambientes (faixas de fatores ambientais) e o contexto (combinações de variáveis) para o qual foram criados e testados;

- Uso de instrumentos de medição não padronizados;
- Procedimentos insatisfatórios de calibração do instrumental de medição.

Na Tabela 5 é apresentada uma listagem com alguns índices de conforto ainda hoje utilizados para caracterização do ambiente térmico de espaços abertos e/ou fechados, juntamente com suas variáveis intervenientes.

Tabela 5- Índices de conforto térmico e suas variáveis intervenientes (MONTEIRO, 2008)

Referência	Índice	Variáveis													
		Individuais				Microclimáticas				Outras		Climáticas			
		M	W	I _{cl}	R _e	t _{ar}	p _v	v _{ar}	t _{rm}	t _g	t _{bu}	t _{bs}	UR	v ₁₀	R
Houghten, 1923; Szokolay, 2001	ET*					x	x								
Vernom, 1932; Szokolay, 2001	CET*					x	x								
Siple & Passel, 1945	WCTI											x		x	
Belding Hatch, 1955	HSI					x	x	x	x						
Yaglou, 1957; ISO 7242, 1989	WBGT					x				x	x				
Thom, 1959	DI					x					x				
Gagge, 1967	SET*	x	x	x	x	x	x	x	x						
Givoni, 1969	ITS					x	x	x	x						
Masterton, 1979	HU					x	x								
Fanger, 1970	PMV/ PPD	x	x	x	x	x	x	x	x						
ASHRAE, 1992; Szokolay, 2001	EOT*					x	x	x	x						
Dominguez, 1992	Sw _{req}	x	x	x	x	x	x	x	x						
Aroztegui, 1995	Tne											x		x	x
De Freitas, 1997	PSI/ STE	x	x	x	x	x	x	x	x						
ASHRAE, 1997	OT					x		x	x						
Höppe, 1999	PET	x	x	x	x	x	x	x	x						
Noguchi & Givoni, 2000	TS					x	x	x	x						
Bluestein & Osczevski, 2002	NWCTI											x		x	
Nikolopoulou, 2004	ASV											x	x	x	x

M é a taxa metabólica

W é o trabalho mecânico externo

I_{cl} é a resistência térmica da roupa ao calor

R_e é a resistência térmica evaporativa da

t_{ar} é a temperatura do ar

HSI é o índice de estresse térmico por calor

WBGT é a temperatura de bulbo úmido e de globo

DI é o índice de desconforto

SET* é a nova temperatura efetiva padrão

ITS é o índice de estresse térmico

p_v é a pressão parcial de vapor d'água	HU é a temperatura equivalente humidex
v_{ar} é a velocidade do ar	PMV/ PPD é o voto médio estimado/ percentual de insatisfeitos
t_{rm} é a temperatura radiante média	EOT* é a nova temperatura operativa efetiva
t_g é a temperatura de globo	Sw_{req} é a taxa de suor requerida
t_{bu} é a temperatura de bulbo úmido	T_{ne} é a temperatura neutra exterior
t_{bs} é a temperatura de bulbo seco	PSI/ STE é o índice de capacidade de armazenamento/ temperatura da pele de equilíbrio do balanço térmico
UR é a umidade relativa	OT é a temperatura operativa
v_{10} é a velocidade do ar a 10 m do solo	PET é a temperatura equivalente fisiológica
R é a troca de calor por radiação	TS é o índice de sensação térmica
ET* é a nova temperatura efetiva	NWCTI é o novo índice de temperatura e resfriamento pelo vento
CET* é a nova temperatura efetiva corrigida	ASV é o voto real de sensação
WCTI é o índice de temperatura e resfriamento pelo vento	

2.2.3.1 Índice de Desconforto (DI) e de Temperatura e Umidade (THI)

O DI, desenvolvido por Thom em 1959, considera o efeito combinado de duas variáveis ambientais: temperatura do ar e umidade. Para o cálculo do DI a Equação 1 utiliza dados de temperaturas de bulbo seco e úmido.

$$DI = 0,72(t_{bs} + t_{bu}) + 40,6 \quad \text{Eq. 1}$$

Na qual:

- DI é o índice de desconforto, em °C;
- t_{bs} é a temperatura de bulbo seco, em °C;
- t_{bu} é a temperatura de bulbo úmido, em °C.

Apesar da existência de índices de conforto bem mais abrangentes por considerar a atuação de maior número de variáveis, o DI tem sido bastante utilizado por se necessitar de dados rapidamente coletáveis com a utilização de instrumental de baixo custo e fácil aquisição e manipulação. Esses instrumentos fornecem os dados de medição, de forma instantânea, por meio de leituras muito simples. Além disso, o processo de classificação do ambiente térmico para humanos é simplificado por seu enquadramento em cinco intervalos pré-definidos, apresentados na Tabela 6, conforme Thom (1959).

Tabela 6- Intervalos de DI e classificação do ambiente térmico (THOM, 1959)

Valores de DI (°C)	Classificação do ambiente
Menor que 70	Sem desconforto
Acima de 70	Menos de 50% das pessoas sentem desconforto
Acima de 75	Mais de 50% das pessoas sentem desconforto
Maior que 79	O desconforto é generalizado

Tendo como parâmetro o índice de Thom, Fanger (1972) estabeleceu novos intervalos para THI- Índice de Temperatura e Umidade, nova nomenclatura adotada, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Intervalos de THI e classificação do ambiente térmico (FANGER, 1972)

Valores de THI (°C)	Classificação do ambiente
Menor que 13	Muito frio
Entre 13 e 16	Frio
Entre 16 e 19	Frio moderado
Entre 19 e 22	Ligeiramente frio
Entre 22 e 25	Confortável
Entre 25 e 28	Ligeiramente quente
Entre 28 e 31	Quente moderado
Entre 31 e 34	Quente
Maior que 34	Muito quente

Fanger utilizou-se da Equação 2, que envolve dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa, para cálculo deste índice.

$$THI = t_{bs} - (0,55 - 0,0055 \cdot UR) \cdot (t_{bs} - 14,5) \quad \text{Eq. 2}$$

Na qual:

THI é o índice de temperatura e umidade, em °C;

t_{bs} é a temperatura de bulbo seco, em °C;

UR é a umidade relativa, em %.

Duas variáveis ambientais importantes no processo de equilíbrio térmico humano, o movimento do ar e a radiação, são subestimadas em THI. Este índice minimiza os efeitos das trocas por evaporação e desconsidera as trocas

por calor radiante uma vez que a resposta de THI ao movimento do ar depende indiretamente do resfriamento dos bulbos seco e úmido (BUDD, 2008).

2.2.3.2 Temperatura de Bulbo Úmido e de Globo (WBGT)

O WBGT foi proposto por Yaglou e Minard, em 1957 e desenvolvido para caracterização do ambiente térmico externo e interno sem radiação solar direta, por meio da Equação 3 e para ambientes externos com radiação solar direta utilizando-se da Equação 4.

$$WBGT = 0,7t_{bu} + 0,3t_{gn} \quad \text{Eq. 3}$$

$$WBGT = 0,7t_{bu} + 0,2t_{gn} + 0,1t_{ar} \quad \text{Eq. 4}$$

Nas quais:

- $WBGT$ é o índice de temperatura de bulbo úmido e globo, em °C;
- t_{bu} é a temperatura de bulbo úmido natural, em °C;
- t_{gn} é a temperatura de globo negro, em °C;
- t_{ar} é temperatura do ar, em °C.

Tanto a ISO 7243 (ISO, 1989) quanto a NR 15 (BRASIL, 1978) adotam o WBGT para avaliar o estresse térmico ao qual o trabalhador está submetido em seu ambiente de trabalho. Essas normas estabelecem o mesmo método de medição e cálculo; contudo, propõem valores-limite diferenciados (MONTEIRO e ALUCCI, 2007).

As faixas adotadas pela norma brasileira, apresentadas na Tabela 8, classificam as atividades em leve ($80,8 \text{ W.m}^{-2} \leq M \leq 96,9 \text{ W.m}^{-2}$), moderada ($116,3 \text{ W.m}^{-2} \leq M \leq 193,8 \text{ W.m}^{-2}$) e pesada ($284,3 \text{ W.m}^{-2} \leq M \leq 355,4 \text{ W.m}^{-2}$).

As taxas metabólicas são apresentadas na NR 15 (BRASIL, 1978) em Kcal.h^{-1} . Para conversão em W.m^{-2} foi considerado um indivíduo com área superficial aproximada de $1,8 \text{ m}^2$, conforme proposto pela ISO 7243 (ISO, 1989).

Tabela 8- Limites de WBGT em função do tipo de atividade e regime de trabalho, segundo NR 15 (BRASIL, 1978)

Regime de trabalho intermitente com descanso no próprio local de trabalho (por hora)	Tipo de atividade		
	Leve	Moderada	Pesada
Trabalho contínuo	até 30,0	até 26,7	até 25,0
45 minutos trabalho 15 minutos descanso	30,1 a 30,5	26,8 a 28,0	25,1 a 25,9
30 minutos trabalho 30 minutos descanso	30,7 a 31,4	28,1 a 29,4	26,0 a 27,9
15 minutos trabalho 45 minutos descanso	31,5 a 32,2	29,5 a 31,1	28,0 a 30,0
Não é permitido o trabalho sem adoção de medidas adequadas de controle	acima de 32,2	acima de 31,1	acima de 30,0

A ISO 7243 (ISO, 1989) adota os valores referenciais para WBGT, conforme a Tabela 9.

Tabela 9- Valores de referência de WBGT para ambientes quentes, segundo a ISO 7243 (ISO, 1989)

Taxa Metabólica (M)		Valor referencial de WBGT (°C)			
Por unidade de área superficial de pele	Total (ADU= 1,8 m ²) (W)	Pessoa aclimatada ao calor		Pessoa não aclimatada ao calor	
M<65	M<117	33		32	
65<M<130	117<M<234	30		29	
130<M<200	234<M<360	28		26	
		Movimento do ar não perceptível	Movimento do ar perceptível	Movimento do ar não perceptível	Movimento do ar perceptível
200<M<260	360<M<468	25	26	22	23
M>260	M>468	23	25	18	20

2.2.3.3 Voto Médio Estimado (PMV) e Percentual de Insatisfeitos (PPD)

O método elaborado por Fanger nos anos 60, conhecido internacionalmente como PMV/PPD, permite calcular uma ampla gama de combinações das variáveis ambientais para determinada combinação de variáveis pessoais (GRZYBOWSKI, 2004).

O PMV foi obtido através do balanço térmico entre o homem e o ambiente, em que a produção de calor pelo organismo, devido à execução de

uma atividade, deve ser dissipada de forma igual ao ambiente, por meio de mecanismos de trocas térmicas (XAVIER, 2000; RUAS, 2001; GRZYBOWSKI, 2004; ISO, 2005).

As normas internacionais ISO 7730 (ISO, 2005) e ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004) adotam o modelo PMV/PPD para determinação analítica e interpretação do conforto térmico.

Segundo a ISO 7730 (ISO, 2005), quando os fatores ambientais e os parâmetros de atividade física e vestuário são estimados ou medidos, a sensação térmica corporal pode ser prevista por meio do PMV. O PPD pode ser obtido a partir do PMV e prevê o percentual de pessoas que podem sentir desconforto térmico em certo ambiente.

O PMV estima o valor médio dos votos na escala de sete pontos de sensação térmica, conforme Tabela 10, podendo ser calculado utilizando-se das Equações 5 a 10.

Tabela 10- Escala de 7 pontos de sensação térmica, segundo ISO 7730 (ISO, 2005)

PMV (adimensional)	Sensação térmica
+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Ligeiramente quente
0	Neutra
-1	Ligeiramente frio
-2	Frio
-3	Muito frio

$$\begin{aligned}
 PMV = & [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \{(M - W) & \text{Eq. 5} \\
 & - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_v] \\
 & - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_v) \\
 & - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_{ar}) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] \\
 & - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_{ar})\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_{cl} = & 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) & \text{Eq. 6} \\
 & - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] \\
 & + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_{ar})\}
 \end{aligned}$$

$$h_c = 2,38 \cdot (f_{cl} - t_{ar})^{0,25} \quad \text{para} \quad 2,38 \cdot (f_{cl} - t_{ar}) \cdot 0,25 > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \quad \text{Eq. 7}$$

ou

$$h_c = 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \quad \text{para} \quad 2,38 \cdot (f_{cl} - t_{ar}) \cdot 0,25 \quad \text{Eq. 8}$$

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 \cdot l_{cl} \quad \text{para} \quad l_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \text{Eq. 9}$$

ou

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645 \cdot l_{cl} \quad \text{para} \quad l_{cl} \geq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \text{Eq. 10}$$

Nas quais:

- PMV* é o voto médio estimado, adimensional;
- M* é a taxa metabólica, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$;
- W* é o poder mecânico efetivo, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$;
- l_{cl}* é o isolamento de roupas, em $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$;
- f_{cl}* é o fator de área de superfície de vestuário;
- t_{ar}* é a temperatura do ar, em °C;
- t_{rm}* é a temperatura média radiante, em °C;
- v_{ar}* é a velocidade relativa do ar, em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- p_v* é a pressão parcial do vapor de água, em Pa;
- h_c* é o coeficiente de transferência de calor por convecção, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$;
- t_{cl}* é a temperatura da superfície da roupa, em °C.

A faixa de aplicação para o índice PMV está compreendida entre valores de -2 a +2 (ambientes térmicos moderados) e com os seis parâmetros principais dentro dos seguintes intervalos:

- M* entre 46 e 232 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (entre 0,8 e 4 met);
- l_{cl}* entre 0 e 0,310 $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ (entre 0 e 2 clo);
- t_{ar}* entre 10 e 30 °C;
- t_{rm}* entre 10 e 40 °C;

V_{ar}	entre 0 e 1 m.s ⁻¹ (durante atividade leve pode ser sentido como corrente de ar);
p_v	entre 0 e 2700 Pa.

A taxa metabólica (M) e o isolamento (I_{cl}) de roupas podem ser estimados com base nas Tabelas 3 e 4 apresentadas anteriormente.

O PPD é um índice complementar ao PMV que estabelece uma previsão quantitativa da percentagem de pessoas insatisfeitas termicamente com o ambiente, que o percebem muito frio ou muito quente. Para os efeitos desta norma as pessoas termicamente descontentes são aqueles que vão votar muito quente, quente, frio ou muito frio na escala de sete pontos de sensação térmica apresentada na Tabela 10. O resto do grupo vai se sentir termicamente neutro (PPD= 5%), ligeiramente morno ou ligeiramente frio (PPD= 10%). O valor de PPD, percentagem de pessoas insatisfeitas, pode ser calculado por meio da Equação 11.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad \text{Eq. 11}$$

Na qual:

- PPD é a percentagem de pessoas insatisfeitas, em %;
- PMV é o voto médio estimado, adimensional.

2.2.3.4 Temperatura Fisiológica Equivalente (PET)

Em 1999, Höppe desenvolve o Modelo de Munich (MEMI). Este modelo se baseia na equação de balanço térmico do corpo humano e calcula a taxa de suor regulatório (em função da temperatura superficial da pele (t_{sk}) e da roupa (t_{cl})) e os fluxos de calor considerando em separado as partes do corpo cobertas e descobertas por roupas, com base em um modelo de dois nós (MONTEIRO, 2008).

Desta maneira, o autor formulou as Equações 12 a 14 para calcular, respectivamente, o balanço energético, o fluxo de calor do centro do corpo para

a superfície da pele e o fluxo de calor da superfície da pele para a superfície externa da roupa.

$$M - W + R + C + Q_{res} - E_{dif} - E_{rsw} = 0 \quad \text{Eq. 12}$$

$$F_{c-sk} = v_b \cdot \rho_b \cdot c_b \cdot (t_c - t_{sk}) \quad \text{Eq. 13}$$

$$F_{sk-cl} = (t_{sk} - t_{cl}) / I_{cl} \quad \text{Eq. 14}$$

Nas quais:

- M é a taxa metabólica, em $W.m^{-2}$;
- W é o trabalho mecânico efetivo, em $W.m^{-2}$;
- R é a troca de calor por radiação, em $W.m^{-2}$;
- C é a troca de calor por convecção, em $W.m^{-2}$;
- Q_{res} é a troca de calor pela respiração, em $W.m^{-2}$;
- E_{dif} é a troca de calor por difusão, em $W.m^{-2}$;
- E_{rsw} é a troca de calor por meio de suor regulatório, em $W.m^{-2}$;
- F_{c-sk} é o fluxo de calor do centro corporal para superfície da pele, em $W.m^{-2}$;
- v_b é o fluxo de sangue do centro corporal para a pele, em $l.s^{-1}.m^{-2}$;
- ρ_b é a densidade do sangue, em $kg.l^{-1}$;
- t_c é a temperatura do centro corporal, em K;
- t_{sk} é a temperatura da superfície da pele, em K;
- c_b é o calor específico do sangue, em $W.s.K^{-1}.kg^{-1}$;
- F_{sk-cl} é o fluxo de calor da superfície da pele para superfície externa da roupa, em $W.m^{-2}$;
- t_{cl} é a temperatura superficial da roupa, em K;
- I_{cl} é o isolamento térmico do vestuário, em $m^2.K.W^{-1}$.

Höppe define o índice PET como sendo a temperatura fisiológica equivalente em determinado ambiente (interno ou externo), na temperatura do ar de um ambiente interno de referência no qual o balanço térmico humano é mantido com temperaturas da pele e do centro corporal, iguais àquelas das condições em avaliação (KRÜGER et al., 2012).

Para o ambiente interno de referência estão estabelecidos os seguintes parâmetros:

- Temperatura radiante média igual à temperatura do ar;
- Velocidade do ar igual a $0,1 \text{ m.s}^{-1}$;
- Pressão de vapor de 12 hPa correspondente a aproximadamente 50% de umidade relativa à temperatura do ar de $20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Resistência da roupa igual a 0,9 clo;
- Atividade metabólica moderada (80 W) adicionada à taxa metabólica basal (34 W), estimando a taxa metabólica total em 114 W.

Em virtude de não terem sido localizadas faixas interpretativas originalmente propostas por seu autor, Monteiro (2008) sugere as faixas definidas na Tabela 11, após procedimentos de calibração, em seu experimento em campo aberto.

Tabela 11- Faixas interpretativas para PET (MONTEIRO, 2008)

PET ($^\circ\text{C}$)	Sensação térmica
>43	Muito calor
>31	Calor
>26	Pouco calor
18-26	Neutra
<18	Pouco frio
<12	Frio
<4	Muito frio

2.2.4 Desempenho térmico do envelope construtivo

De acordo com a NBR 15575:1 (ABNT, 2013), o desempenho térmico do edifício depende da interatividade entre o comportamento térmico dos elementos que compõem sua envoltória, em especial, fachadas e coberturas.

A afirmação acima aponta para a existência de diferença entre comportamento térmico e desempenho térmico.

Comportamento térmico é a resposta física da edificação quando submetida às variáveis ambientais e aos padrões de uso do espaço interno, com ênfase na geração de calor advindo da utilização de equipamentos e da atividade metabólica de seus usuários. Esta resposta pode ser identificada pela

observação de fatores, como variação de temperatura e umidade do ar interno ou do fluxo térmico transmitido através das vedações. Quando tais fatores são comparados a valores referenciais tem-se uma avaliação do desempenho térmico da edificação (BATISTA e LAMBERTS, 2010).

Segundo Carvalho (2012), as normas brasileiras que tratam dos procedimentos de avaliação de desempenho térmico e energético de edificações são o conjunto da NBR 15575 (ABNT, 2013) e o conjunto da NBR 15220 (ABNT, 2005).

A NBR 15575:1 (ABNT, 2013) estabelece os três procedimentos para avaliação de adequação térmica da edificação: simplificado (de caráter normativo); simulação computacional e medição (ambos de caráter informativo), além dos requisitos a serem contemplados pelos sistemas de vedações verticais (internas e externas) e pelos subsistemas de cobertura.

Para avaliação do desempenho térmico por medição no período de inverno esta norma estabelece que o valor mínimo diário de temperatura do ar no interior de recintos de permanência prolongada (salas e dormitórios), no dia típico de inverno, deve ser sempre maior ou igual ao da temperatura mínima externa acrescida de 3 °C. Em se tratando da avaliação simplificada determina, ainda, a verificação do atendimento aos requisitos estabelecidos nas partes NBR 15575:4 (ABNT, 2013) e NBR 15575:5 (ABNT, 2013) baseados nos critérios constantes da NBR 15220:2 (ABNT, 2005).

A NBR 15220:2 (ABNT, 2005) determina os métodos de cálculo das propriedades térmicas dos componentes das edificações (resistência, transmitância, capacidade e atraso térmico, além do fator solar de elementos e componentes de edificações) e o zoneamento bioclimático brasileiro, propondo diretrizes construtivas para as habitações de interesse social.

O zoneamento bioclimático brasileiro compreende oito zonas definidas, conforme apresentado na Figura 6, segundo o critério de homogeneidade quanto ao clima. Para cada uma foi formulado um conjunto de recomendações técnico-construtivas a fim de otimizar o desempenho térmico das edificações. Segundo a NBR 15220:3 (ABNT, 2005), mais da metade (53,7%) do território brasileiro é zoneado como ZB08, sendo o município de Campina Grande parte integrante desta zona.

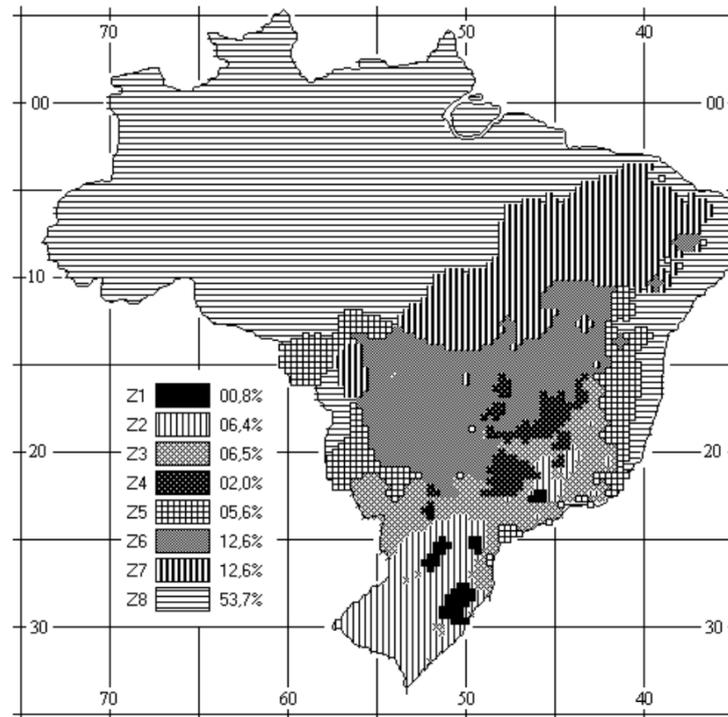


Figura 6- Zoneamento bioclimático brasileiro
Fonte: NBR 15220:3 (ABNT, 2005)

2.2.4.1 Recomendações técnicas e construtivas para a zona bioclimática 08 (ZB08)

A NBR 15220:3 (ABNT, 2005) estabelece que as habitações localizadas na ZB08 devem possuir vedações externas (paredes e cobertura) do tipo leves refletoras e grandes aberturas sombreadas para ventilação e recomenda a ventilação cruzada permanente no verão, para melhoria da sensação térmica pela desumidificação dos ambientes ressaltando a ineficiência do condicionamento passivo durante as horas mais quentes do dia definido, ainda, os valores de algumas propriedades térmicas admissíveis para as vedações do tipo leves refletoras, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12- Valores admissíveis para vedações externas do tipo leves refletoras, segundo NBR 15220:3 (ABNT, 2005)

Vedação externa (leve refletora)	Propriedades		
	Transmitância térmica (U)	Atraso térmico (ϕ)	Fator solar (FS_o)
	$W.m^{-2}.K^{-1}$	Horas	%
Paredes	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	$FS_o \leq 4,0$
Cobertura	$U \leq 2,30. FT$	$\phi \leq 3,3$	$FS_o \leq 6,5$

$FT = 1,17 - 1,07.h^{-1,04}$

Sendo:

FT é o fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da ZB08, adimensional;

h é a altura da abertura em dois beirais opostos, em cm.

Coberturas em telhas de barro sem forro poderão ser aceitas na ZB08, desde que suas superfícies não sejam esmaltadas nem pintadas. Coberturas que apresentem valor de transmitância térmica acima do tabelado deverão conter aberturas para ventilação, ao longo de toda a extensão da fachada, em no mínimo dois beirais opostos.

As grandes aberturas de ventilação deverão possuir área efetiva para ventilação superior a 40% da área de piso, em ambientes de longa permanência. Essas recomendações descritas na NBR 15220:3 (ABNT, 2005) diferem dos valores admissíveis constantes da NBR 15575:4 (ABNT, 2013) e da NBR 15575:5 (ABNT, 2013).

Tabela 13- Valores mínimos de U e C_T para habitações localizadas na ZB08, segundo NBR 15575:4 (ABNT, 2013)

Paredes externas		
Transmitância térmica (U)		Capacidade térmica (C_T)
$W.m^{-2}.K^{-1}$		$kJ.m^{-2}.K^{-1}$
$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	Sem exigência
$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$	

α é a absorvância à radiação solar da superfície externa da parede

Na Tabela 13 são apresentados os valores mínimos de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C_T), para classificação de desempenho térmico de paredes na categoria mínimo satisfatório. Esses valores, válidos para edificações localizadas na ZB08, estão estabelecidos na NBR 15575:4 (ABNT, 2013).

Esta mesma norma define que as áreas das aberturas de ventilação para os ambientes de permanência prolongada nas regiões NE e SE do Brasil,

devem seguir a legislação específica do local de implantação. Não havendo exigências de ordem legal devem ser grandes, com área efetiva de abertura igual ou superior a 8% da área do piso do ambiente em questão.

Para as coberturas a NBR 15575:5 (ABNT, 2013) exige o atendimento aos critérios apresentados na Tabela 14.

Tabela 14- Valores de U para coberturas de habitações localizadas na ZB08, segundo NBR 15575:5 (ABNT, 2013)

Coberturas	
Transmitância térmica (U)	
$W.m^{-2}.K^{-1}$	
$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
$U \leq 2,30.FT$	$U \leq 1,5 FT$

α é a absorvância à radiação solar da superfície externa da parede

FT é o fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da ZB08, conforme cálculo proposto pela NBR 15220:3 (ABNT, 2005)

2.2.4.2 Comportamento térmico dos fechamentos

A compreensão da importância relativa dessas propriedades face ao desempenho térmico da envoltória passa pelo entendimento do processo de transmissão de calor em fechamentos opacos e transparentes.

2.2.4.2.1 Fluxo térmico através de fechamentos opacos

Segundo Lamberts et al. (1997) e Roriz (2008), em um fechamento opaco a transmissão de calor ocorre sempre que há diferença de temperaturas superficiais, interna e externa. A Figura 7 ilustra as três fases sequenciais do processo quando a temperatura do ar (t_{ar}) do exterior é superior à do interior:

1. Troca térmica, por radiação e convecção, com o meio externo;
2. Troca térmica, por condução, através do elemento;
3. Troca térmica, por radiação e convecção, com meio interno.

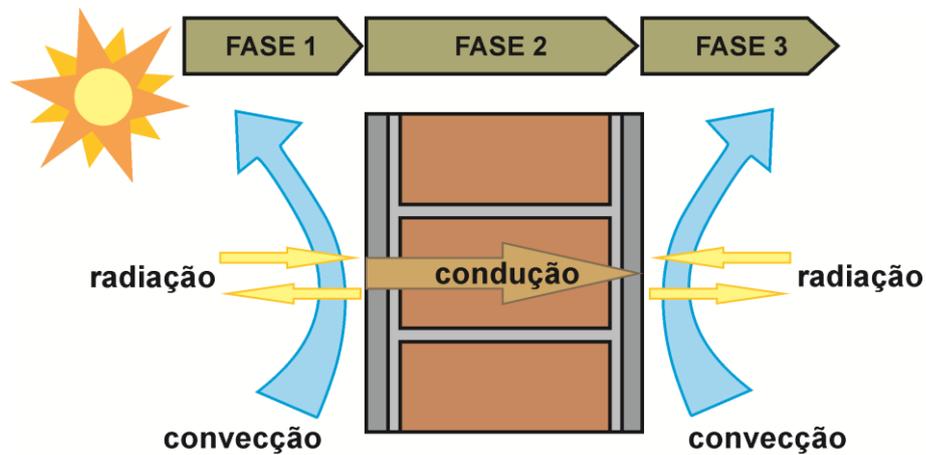


Figura 7- Fases do processo de transmissão de calor em fechamentos opacos

Na fase 1 a face externa do componente construtivo terá sua temperatura alterada em função de sua Resistência Superficial Externa (R_{se}) visto que materiais com alta resistência térmica possuem baixa capacidade de condução de calor. Segundo a NBR 15220:2 (ABNT, 2005), o valor adotado para R_{se} é de $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, independente da direção do fluxo de calor.

Do total da radiação incidente sobre a face externa do componente opaco parte é refletida de volta para o meio e a outra parte é absorvida e será conduzida para o interior do fechamento. Os quantitativos das parcelas refletida e absorvida variam com a refletância (ρ) e a absortância (α) do material (LAMBERTS et al., 2005). Os valores de refletância e absortância sugeridos pela NBR 15220:2 (ABNT, 2005), constam da Tabela 15.

Tabela 15- Valores de absortância e refletância de alguns materiais, segundo NBR 15220:2 (ABNT, 2005)

Tipo de superfície	α	Tipo de superfície	α
Alumínio polido	0,05	Revestimento asfáltico	0,85/0,98
Alumínio oxidado	0,15	Pintura: Branca	0,20
Aço galvanizado polido	0,25	Amarela	0,30
Caiação nova	0,12/0,15	alumínio/ verde	0,40
Concreto e tijolo aparente	0,65/0,80	verde escura	0,70
Telha de barro	0,75/0,80	Vermelha	0,74
Reboco claro	0,30/0,50	Preta	0,97

Observação: (ρ) = 1- (α)

Segundo Olgay (2008), a refletância do espectro visível da radiação solar está relacionada à cor superficial sendo da ordem de 90% ou mais nas

brancas enquanto nas negras, 15% ou menos. Em se tratando da radiação de ondas longas - predominantes nas trocas de calor com o entorno, a refletância depende mais da densidade superficial e de sua composição molecular que de sua cor.

Na fase 2, com o incremento da temperatura superficial externa, o calor será conduzido através do fechamento sendo a intensidade desse fluxo de calor dependente da condutividade térmica (λ) e da espessura do material (e). Desta forma, a Resistência Térmica (R_T), para fechamentos opacos com camada homogênea de igual espessura, será maior quanto menor for o valor de condutividade térmica do material.

A Resistência e a Transmitância Térmica (U) são propriedades de grandezas inversamente proporcionais que dependem do valor isolante do material. O uso coerente dessas propriedades térmicas será favorável para amortizar as cargas de calor diminuindo as amplitudes térmicas no interior da edificação (OLGYAY, 2008).

Quando o efeito desejado for de defasagem entre os ciclos de temperatura internos e externos, conhecido como inércia térmica, deve-se recorrer à propriedade de Capacidade Térmica (C_T) do material. Maiores valores de C tornam possível armazenar as cargas produzidas nos momentos de calor e liberá-las nos momentos de baixa temperatura (OLGYAY, 2008).

Pode-se lançar mão de alguns recursos para diminuir os valores de Transmitância e aumentar a inércia térmica: no primeiro caso, o emprego de fechamentos opacos com múltiplas camadas (homogêneas e/ou não homogêneas) e a adoção de câmaras de ar (ventiladas ou não ventiladas); no segundo, o uso de materiais mais densos e, em geral, mais pesados.

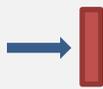
Diferente do apresentado na Figura 06 em câmaras de ar as trocas térmicas ocorrem por convecção e por radiação. Nas trocas por convecção depende da inclinação do fechamento e da direção do fluxo e naquelas por radiação, da emissividade (ϵ) da superfície do material em contato com a câmara de ar. A emissividade, conforme a Tabela 16, é consequência do tipo de material, se metálicos ou não, os primeiros possuidores de menores valores de ϵ (LAMBERTS et al., 1997).

Tabela 16- Valores de emissividade de alguns materiais, segundo NBR 15220:2 (ABNT, 2005)

Tipo de superfície	ε	Tipo de superfície	ε
Alumínio polido	0,05	Demais materiais (opacos)	~0,90
Alumínio oxidado	0,12	Pintura (diversas cores)	0,90
Aço galvanizado polido	0,25	Pintura “alumínio”	0,50

Na fase 3 ocorrerá o aumento da temperatura da superfície interna do fechamento, pelo ganho de calor advindo das camadas anteriores. As perdas de calor por convecção e por radiação, do fechamento para o meio interno, dependerão da Resistência Superficial Interna (R_{si}) do fechamento e da Emissividade (ϵ) superficial do material, respectivamente. Os valores de R_{si} são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17- Resistências térmicas superficiais, segundo NBR 15220:2 (ABNT, 2005)

R_{si} ($m^2.K.W^{-1}$)		
Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente
		
0,13	0,10	0,17

2.2.4.2.2 Fluxo térmico através de fechamentos transparentes

Através dos fechamentos transparentes (vidros), translúcidos (plásticos) e de janelas abertas, a radiação solar pode penetrar e aquecer o interior do edifício. Quando janelas estão abertas existe um fluxo de ar livre, entre o interior e o exterior. Quando as janelas estão fechadas oferecem baixa resistência ao fluxo de calor e permitem a infiltração de ar por entre suas frestas (GIVONI, 1976).

Nos fechamentos transparentes e translúcidos as trocas térmicas se dão por convecção, condução e radiação sendo este último o processo mais importante em virtude da parcela de calor diretamente transmitida ao interior. O quantitativo da parcela transmitida da radiação externa varia conforme a Transmissividade (τ) do vidro.

Desta forma, a orientação e a dimensão das aberturas, o tipo de vidro ou plástico empregado e o uso de elementos opacos como protetores contra os raios solares (brise-soleil, marquise, beiral, cortina, etc.) influenciam na intensidade dos ganhos térmicos.

A orientação da fachada e o ângulo de incidência dos raios solares podem expor janelas de iguais dimensões à quantidade de radiação (ondas curtas e longas) diferente enquanto o tamanho das aberturas determina a quantidade de calor que pode adentrar ou sair do ambiente (LAMBERTS et al., 1997).

Quanto ao tipo de vidro e de alguns plásticos transparentes a única propriedade responsável por seus efeitos térmicos específicos é o diferencial de transparência para diferentes tamanhos de onda de radiação. Enquanto transmite a maior parte da radiação na faixa de 0,4 a 2,5 μ , que coincide aproximadamente com o intervalo do espectro visível, o vidro é completamente opaco à radiação de comprimento de onda mais longo, em torno de 10 μ (GIVONI, 1976).

Desta maneira, o vidro permite que boa parte da radiação solar penetre o edifício para ser absorvida pelas superfícies e objetos internos que, em sequência, emitem radiação de ondas longas. Esta radiação encontra, no vidro, uma barreira para sua transmissão no sentido inverso, para o exterior do envelope construtivo, processo este comumente denominado “efeito estufa” por causar elevação na temperatura interna.

A transmitância de luz e calor varia conforme o tipo de vidro. Na prática, todos os vidros absorvem e refletem a radiação solar, mas películas e vidros absorventes (fumês e coloridos) absorvem mais enquanto aqueles reflexivos (espelhados) refletem mais a radiação infravermelha quando comparados a outros vidros. Os materiais plásticos, tais como o policarbonato e o acrílico, são consideravelmente transparentes às radiações de onda longa, sendo recomendados para diminuição do “efeito estufa” e consequentes ganhos nas perdas de calor para o espaço externo. O comportamento de alguns materiais transparentes frente à radiação é apresentado esquematicamente na Figura 8.

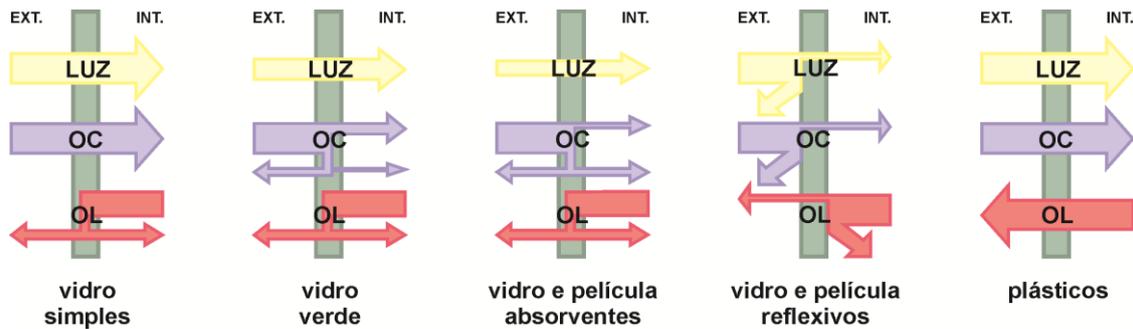


Figura 8- Comportamento de materiais transparentes à radiação de ondas curtas, longas e luz visível (LAMBERTS et al., 1997)

A grande vantagem do uso de protetores solar internos é a possibilidade de controle do nível de iluminação, porém não reduz o “efeito estufa”. Os protetores solar externos, quando corretamente dimensionados e bem localizados, colaboram para a minoração da incidência da radiação solar mantendo o efeito de iluminação natural em zonas satisfatórias.

2.2.5 Ventilação natural

A troca entre o ar externo e o ar do interior de um edifício pode ser dividida em duas grandes classificações: ventilação (natural ou forçada) e infiltração. A ventilação natural é a introdução intencional de ar do exterior para o interior do edifício, dirigida pelos diferenciais de pressão, através de janelas abertas, portas, grades e outras penetrações por meio do envelope da edificação enquanto infiltração é o fluxo incontrolado do ar externo para dentro do edifício por meio de frestas e outras aberturas intencionais e através do uso de portas externas para entrada e saída de pessoas (ASHRAE, 2005).

Bittencourt e Cândido (2010) listam três finalidades complementares no uso da ventilação natural:

- Manutenção da qualidade do ar nos ambientes internos removendo as impurezas existentes e mantendo os níveis de oxigênio em patamares apropriados;
- Remoção da carga térmica adquirida pela edificação decorrente dos ganhos de calor, externos e internos, advindos da exposição à radiação

solar e da produção de calor por usuários, por equipamentos elétricos e eletrônicos;

- c) Promoção do resfriamento fisiológico dos usuários pelo efeito refrescante provocado pela evaporação do suor da pele e pelas trocas de calor por convecção. O resfriamento fisiológico é particularmente importante em regiões com elevada umidade do ar, pois a pele úmida é frequentemente apontada como a principal causa de desconforto.

As forças que proporcionam a ventilação natural em uma edificação podem ser agrupadas em movimentos do ar produzidos por diferenças de pressão por ação dos ventos e por diferenças de temperatura. As duas podem atuar isoladamente, em conjunto ou em oposição, sempre dependendo das condições atmosféricas e da forma do edifício (OLGYAY, 2008).

A ventilação natural, cruzada e/ou vertical, pode ser induzida pela aplicação de princípios projetuais baseados na bioclimatologia e por elementos arquitetônicos estrategicamente posicionados. Dentre os princípios inventivos pode-se citar os cuidados com a implantação do edifício em função da topografia do terreno e dos ventos predominantes e, dentre os elementos de arquitetura: a forma e as dimensões do prédio, a tipologia da cobertura, a localização e as dimensões relativas dos vãos de ventilação, além das cercas, dos muros e da vegetação nos limites mais próximos da edificação (LAMBERTS et al., 1997).

2.2.5.1 Ventilação por diferença de pressão por ação dos ventos

Esta estratégia de ventilação é também conhecida como ventilação cruzada ou horizontal.

Uma habitação situada em uma corrente de ar diminui sua velocidade, acumulando o ar em sua fachada mais exposta, originando uma área de pressão relativamente alta. O movimento do ar no exterior de uma edificação cria zonas de baixa pressão nas fachadas adjacentes àquela mais exposta e a sotavento da edificação, conforme apresentado na Figura 9. Esta sombra, ou

esteira de vento se encherá de ar gradualmente de maneira que, a uma distância do dobro da altura, o ar se encontra em repouso (OLGYAY, 2008).

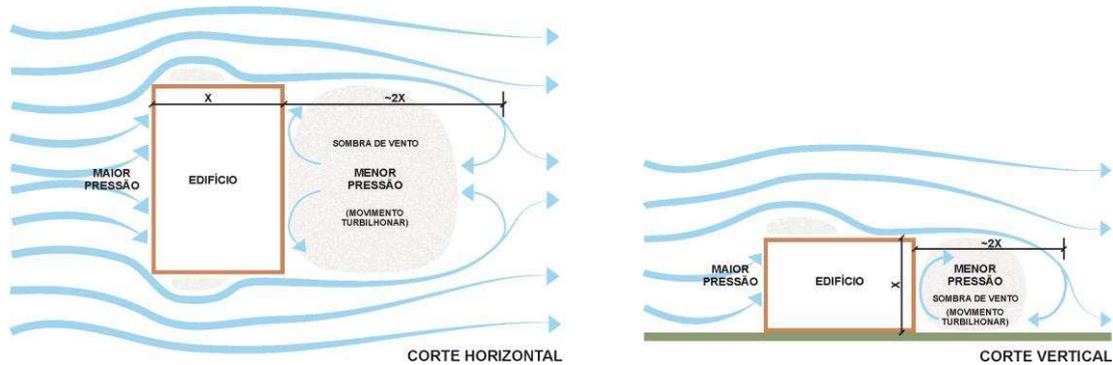


Figura 9- Modelo esquemático do movimento do ar ao redor de um edifício
Fonte: Baseada em Olgay (2008)

É importante salientar que a forma como o ar se movimenta ao redor de uma edificação é determinada pela geometria (forma e dimensões) e não depende da velocidade do vento.

Amplios beirais, marquises e varandas afetam levemente a profundidade da esteira do vento independente da posição dos beirais (sotavento ou barlavento) e de seu tamanho. Quanto maior a inclinação dos planos da cobertura tanto maior será a profundidade da sombra de vento. Sombras de vento ampliadas significam zonas de pressão ainda menores o que resulta em um fluxo de ar interno 15% maior quando comparado a construções com cobertura plana (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2010).

Outros elementos que influenciam o movimento do ar no exterior das edificações, são as cercas e os muros no limite dos lotes, especialmente se forem altos, fechados e pouco recuados em relação às aberturas de ventilação; sua ausência acentua a velocidade do vento em torno das construções.

As diferenças de pressão no exterior dos edifícios contribuem para o movimento do ar em seu interior desde que existam aberturas não obstaculizadas, de captação, nas áreas de maior pressão e de exaustão naquelas de pressão menos elevada.

Grandes aberturas localizadas em fachadas opostas, em zonas de pressão positiva e negativa, proporcionarão o máximo de renovação de ar no interior do espaço enquanto aberturas de captação menores que as de

exaustão garantem maiores velocidade do ar no interior que no exterior da edificação (OLGYAY, 2008).

Devido ao efeito de inércia o fluxo de ar em interiores tende a seguir sua direção original, a não ser que encontre algum obstáculo que o desvie até a saída. Aberturas de ventilação colocadas simetricamente em zonas de igual pressão resultarão em fluxo perpendicular; de maneira análoga, produzirão fluxo oblíquo se posicionadas assimetricamente. Qualquer elemento que concorra para alterar a direção do fluxo de ar, seja ele uma divisória, uma mobília ou um equipamento, reduz sua velocidade. O fluxo horizontal de ar no interior das construções segue esquematicamente os modelos apresentados nas Figuras 10 e 11 (OLGYAY, 2008).

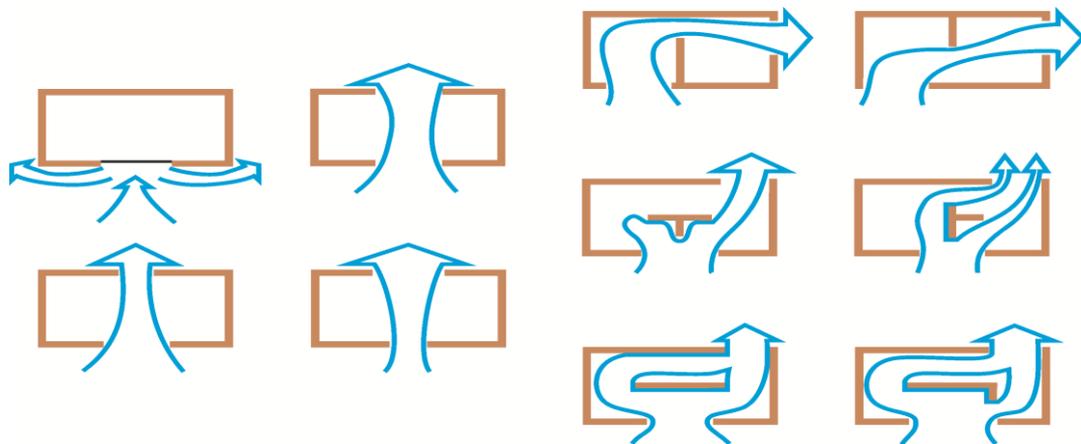


Figura 10- Esquema horizontal do fluxo de ar no interior de uma edificação em função de suas subdivisões
Fonte: Baseada em Olgay (2008)

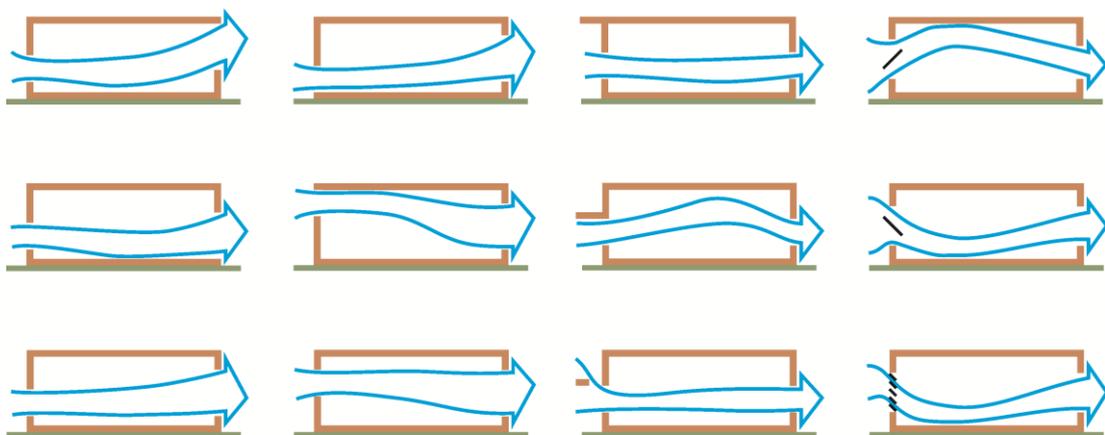


Figura 11- Esquema do efeito direcional em função das aberturas de entrada do ar
Fonte: Baseada em Olgay (2008)

2.2.5.2 Ventilação por diferença de pressão por temperatura

A existência de diferença de temperatura entre o ar no interior e do exterior do edifício origina uma coluna ascendente de ar quente devido principalmente ao efeito gravitacional sobre a diferença de peso. A renovação do ar por gravidade é um dos motivos para a utilização de tetos altos em ambientes quentes (OLGYAY, 2008).

O modelo esquemático de fluxo de ar por diferença de temperatura no interior de uma edificação é apresentado na Figura 12.

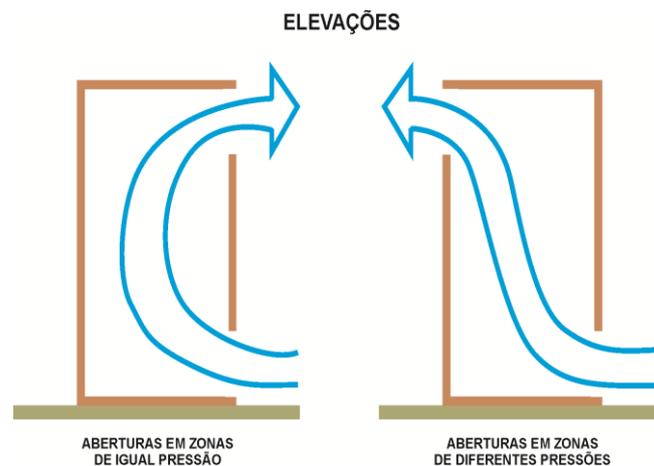


Figura 12- Esquema, em elevação, de modelos de fluxo de ar por “efeito chaminé”

Este tipo de ventilação é também conhecido como ventilação vertical ou “efeito chaminé”.

A pressão estática se constitui na força motriz desse fenômeno. Em uma chaminé o ar aquecido torna-se mais leve que o ar circundante e tende a subir, o que provoca deslocamento de massas de ar circundantes, com temperaturas mais baixas para ocupar o lugar do ar quente que subiu e se dissipou pela chaminé. Este ar fresco que preencheu o espaço deixado pelo ar quente vai sendo aquecido até que, por sua vez, vai também ascendendo, provocando, assim, um ciclo contínuo de movimentação do ar (BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2010).

2.3 Simulação Computacional

A utilização da simulação computacional como ferramenta auxiliar no processo de tomada de decisões projetuais vem-se consolidando como alternativa viável, porém pouco acessível a escritórios de arquitetura brasileiros restringindo-se, quase sempre, a grupos de pesquisas de pequeno e médio porte (TRINDADE et al., 2010).

Os programas de simulação de desempenho termo-energético calculam as complexas relações entre o edifício e o ambiente externo. Os primeiros estudos realizados no Brasil, por Bulla (1995) e, também, por Gómez e Lamberts (1995), visavam ao estudo paramétrico de edificações hipotéticas na cidade de Florianópolis. O primeiro abordou o efeito da orientação da edificação, da absorvância e transmitância térmica de paredes, tamanho e coeficiente de sombreamento das janelas enquanto o outro tratou da influência do número de pavimentos, da forma, orientação das zonas e da maior fachada (LIMA, 2007).

A NBR 15575:1 (ABNT, 2013) preconiza a avaliação de desempenho térmico por simulação para edifícios construídos ou em fase conceitual e homologa o uso do software EnergyPlus.

Em se tratando de espaços construídos faz-se necessária a calibração do modelo computacional a fim de aproximá-lo ao máximo do edifício real. Tal procedimento foi previsto por Lamberts, et al. (1997) e recentemente adotado por Pereira e Ghisi (2010).

O EnergyPlus, software autônomo desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, foi concebido para modelar sistemas de aquecimento, resfriamento, iluminação, ventilação e consumo energético globais; apesar de não possui interface gráfica amigável, disponibiliza uma forte base de cálculo adaptável a interfaces desenvolvidas por terceiros.

O DesignBuilder consiste de uma ferramenta de simulação de desempenho térmico e energético com interface amigável que permite a visualização tridimensional da geometria desenhada cujos algoritmos de cálculo e bibliotecas se baseiam no EnergyPlus, software devidamente validado pela ASHRAE.

Testes comparativos baseados em procedimentos recomendados pela ASHRAE atestam que os resultados de simulações gerados pelo DesignBuilder são similares àqueles produzidos pelo EnergyPlus (DESIGNBUILDER, 2013).

Permite realizar simulações para diferentes climas a partir de arquivos climáticos com dados horários e, segundo Lima (2007), como resultado das simulações pode-se obter:

- Dados de temperaturas internas e superficiais,
- Relatórios sobre as trocas térmicas dos diversos elementos construtivos, as trocas por infiltração e ventilação, os ganhos térmicos internos advindos da ocupação e da incidência de radiação por aberturas;
- Documentos de saída com estimativas do consumo energético- com climatização, iluminação e demais equipamentos-, o consumo de outros tipos de combustível e as emissões de carbono;
- Cálculo de ventilação para um ambiente com taxa de renovação de ar por hora e as perdas térmicas por ventilação;
- Predição de alguns índices de conforto térmico.

Para análises detalhadas acerca dos vetores do fluxo de ar, tal como da distribuição das temperaturas e dos contaminantes dentro de um espaço ventilado torna-se necessário o uso do módulo CFD - Dinâmica dos fluidos computacional. No entanto, quando é conveniente a diminuição do tempo de simulação e se deseja obter dados em campos relacionados à temperatura e velocidade do ar, pode-se recorrer aos modelos zonais que, apesar de sua menor complexidade frente às modelagens CFD, fornecem resultados bastante detalhados. Os modelos zonais se baseiam na hipótese de que o ar no interior das zonas é homogêneo, sendo totalmente misturado (MATOS, 2007).

Dentre as desvantagens do uso do DesignBuilder estão a dificuldade de realização de simulações paramétricas uma vez que as variáveis são alternadas manualmente e o maior tempo de simulação em modelos mais complexos (LIMA, 2007).

No entanto, essas limitações de modelagem em nada comprometem a validade dos resultados para avaliação do comportamento térmico e energético de edificações reais, ventiladas naturalmente ou não.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização climática de Campina Grande

O município de Campina Grande está localizado na mesorregião do agreste paraibano e inserido na macrorregião do Planalto da Borborema (AESA, 2009). O clima predominante na cidade é tropical úmido, segundo a classificação de Köppen, descrita por Romero (2000).

A temperatura média anual é acima de 20 °C com temperatura absoluta máxima de 34 °C e mínima de 13,2 °C. A umidade relativa do ar varia entre 72 e 91%, com média anual de 83,2%. A precipitação acumulada mensal oscila entre 13,2 (novembro) e 154 mm (julho), sendo o total anual de 875,4 mm. O período mais chuvoso está compreendido entre os meses de abril a julho e os meses mais secos são os de outubro e novembro. Quanto à intensidade do vento, a média anual é de 3,25 m.s⁻¹, com direção predominante leste, no período de agosto a maio e sudeste nos meses de junho e julho. A insolação total anual é de 2.419,7 h e a nebulosidade média anual de 0,7 (INMET, 2009).

A temperatura máxima de bulbo seco apresenta valores que variam de 25 a 30 °C no decorrer do ano enquanto a temperatura mínima varia de 18 a 20 °C. As temperaturas máximas mais baixas, quando comparadas com as da capital paraibana, são justificadas pelo efeito da elevada altitude de Campina Grande que é de 547,60 m; já a grande amplitude térmica de 12 °C pode ser explicada pela distância de 112 km, que separa o município em questão das massas d'água oceânicas.

3.2 Descrição dos tratamentos

A edificação residencial unifamiliar utilizada como meio experimental, encontra-se localizada no setor Sudoeste do município de Campina Grande/PB, no loteamento Acácio Figueiredo, bairro da Catingueira, nas coordenadas geográficas 7°16'8"S, 35°55'27"O. A fase experimental foi composta de 05 etapas (tratamentos) com 05 dias de medição por etapa e com coleta de dados

no período de maio a julho de 2013. As configurações dos tratamentos são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18- Nomenclatura adotada, descrição dos tratamentos e período de coleta de dados

Abreviação	Descrição	Período
JBCfe	Janelas, bandeiras e combogós fechados	28/05 a 01/06
Bab_Cfe	Bandeiras abertas (das 8:00 às 17:00 h); combogós fechados	11/06 a 15/06
Bab_Cab	Bandeiras abertas (das 8:00 às 17:00 h); combogós abertos	24/06 a 28/06
JBab_Cfe	Janelas e bandeiras abertas (das 8:00 às 17:00 h); combogós fechados	17/06 a 21/06
JBab_Cab	Janelas e bandeiras abertas (das 8:00 às 17:00 h); combogós abertos	01/07 a 05/07

Durante o experimento nos períodos diurno e noturno foram coletados, a cada hora, dados de temperatura ambientais (bulbo seco, bulbo úmido e globo negro) e superficiais (paredes exterior e interior, coberturas superior e interior). Os dados de velocidade do ar foram coletados em dias alternados para cada tratamento (2, 3, 4 e 5), no período matutino (8 h e 9 h) e no período vespertino (16 h e 17 h), totalizando 03 dias de medição por tratamento. Durante o tratamento JBCfe não foram coletados dados de velocidade do ar.

3.3 Caracterização do meio experimental

3.3.1 A unidade habitacional

A escolha da unidade habitacional cujas fachadas são apresentadas nas Figuras 13 e 14 foi motivada por ter sido um projeto elaborado por professores e alunos da pós-graduação em Engenharia Agrícola, da UFCG, especificamente no Laboratório de Construções Rurais e Ambiência - LaCRA, financiada com recursos advindos do CNPQ, que tinha como objetivo principal propor um modelo de desempenho térmico satisfatório a ser reproduzido no Semiárido paraibano, que servisse de espaço de testes e vitrine para as técnicas e/ou materiais construtivos desenvolvidos neste centro de pesquisa. Atualmente, se encontra desocupada, isto é, sem moradores, mobília e eletrodomésticos.



Figura 13- Vista das fachadas Leste (frontal) e Norte (lateral direita)



Figura 14- Vista das fachadas Norte (lateral direita) e Oeste (posterior)

3.3.1.1 O partido arquitetônico

O projeto arquitetônico da edificação incorpora os princípios da arquitetura bioclimática e atende a todos os requisitos estabelecidos pelo Código de Obras e Edificações de Campina Grande (2006).

Para sua implantação no terreno, orientação de seus cômodos, localização de suas aberturas de ventilação (captação e exaustão) e opção por

tipologia de cobertura, foram consideradas as recomendações contidas na NBR 15220:3 (ABNT, 2005), além do comportamento do vento e a trajetória solar, visando a um aproveitamento melhor da ventilação e iluminação naturais com o objetivo de otimizar o desempenho térmico da edificação.

O critério que norteou a escolha da técnica e dos materiais construtivos foi o da garantia de facilidade de acesso aos mesmos, permitindo o emprego de mão-de-obra pouco especializada e materiais disponíveis em pequenos depósitos de construção.

Desta forma usou-se técnica construtiva tradicional na qual a fundação foi executada em alvenaria corrida de pedra rachão, a superestrutura em peças de concreto pré-moldado e armado, além de alvenarias cerâmicas utilizadas ora como elementos estruturais ora como de vedação. Para a cobertura, utilizaram-se engradamento em madeira mista e cobertura em telhas cerâmicas do tipo romana.

A tipologia de cobertura adotada foi devida tanto à sua eficiência como captadora e coletora de águas pluviais quanto ao estímulo à ventilação natural cruzada proporcionada por sua forma. A existência de pés-direitos distintos permite a abertura de vãos com diferentes alturas, em fachadas opostas e paredes altas que, localizadas a sotavento, geram uma grande zona de baixa pressão que auxilia na exaustão do ar interno.

3.3.1.2 A implantação

O terreno em que a unidade residencial está construída possui área de 6 ha aproximadamente e limite frontal orientado a Leste. A topografia de sua porção central frontal é altiplana apresentando leve declividade para ambas laterais e maior declividade no sentido transversal em direção ao seu limite posterior. A residência ocupa a parcela frontal altiplana do terreno com afastamento frontal medindo 22 m e afastamentos laterais, direito e esquerdo, medindo 15 e 12 m, respectivamente, conforme apresentado na Figura 15; a adoção desses recuos garantiu o não sombreamento da unidade habitacional por outras edificações próximas.



Figura 15- Imagem superior com implantação da unidade habitacional
Fonte: Google Earth- Acesso em 26/04/2013

3.3.1.3 A planta baixa

A residência possui planta baixa de formato quadrangular - em função da tipologia adotada para a cobertura, conforme apresentado na Figura 16.

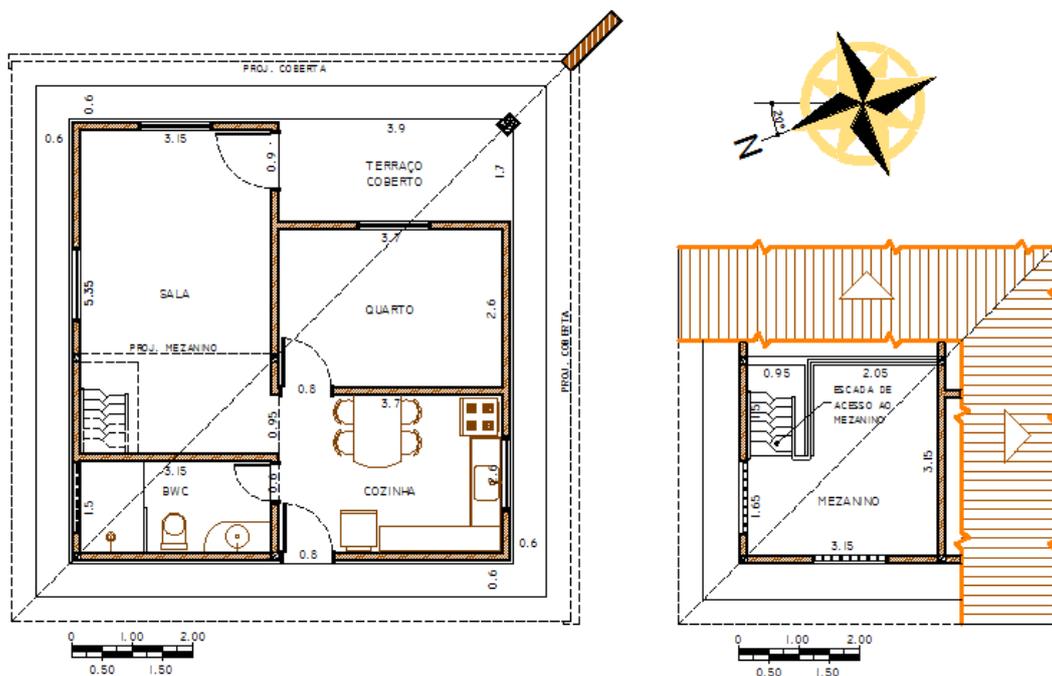


Figura 16- Plantas baixas dos pavimentos térreo e mezanino

A área de construção do pavimento térreo é de 54,76 m² e do mezanino, igual a 10,00 m²; sua área de cobertura mede 86,49 m². Abriga seis cômodos: terraço coberto, sala (estar e jantar), quarto, cozinha, banheiro e mezanino multiuso, dispostos de tal forma que os ambientes de permanência prolongada (sala e quarto) estão orientados para nordeste e sudeste, respectivamente. O mezanino, apesar de captar a ventilação proveniente da sala, está localizado no quadrante noroeste da residência, assim como o banheiro e a cozinha ocupa o setor orientado a sudoeste.

3.3.2 O objeto de estudo

O objeto de estudo é composto da sala, no pavimento térreo, e do mezanino da edificação residencial unifamiliar, descrita como mostra a Figura 17.

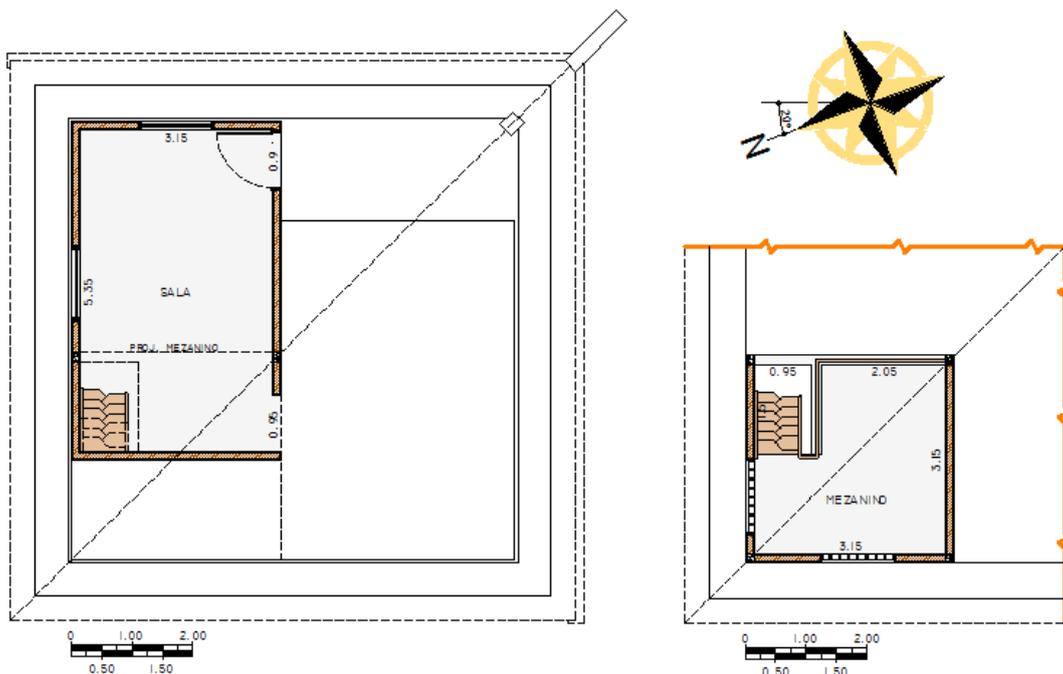


Figura 17- Plantas baixas da sala e do mezanino, ambientes do objeto de estudo

Alguns aspectos influenciaram a seleção desses ambientes para estudo, entre eles: sua característica volumétrica, que proporciona conexão entre sala e mezanino, transformando-os em espaço único, com grande fluidez do ar; sua importância como ambiente de permanência prolongada; sua área de

construção, além de sua localização e orientação com fachadas voltadas para as direções leste, norte e oeste.

A sala, com área útil de 16,85 m², está localizada no pavimento térreo. O mezanino, que ocupa o piso superior, tem área útil de 7,72 m². As alturas no interior desses ambientes são variáveis em função da tipologia adotada para a cobertura, conforme apresentado na Figura 18.

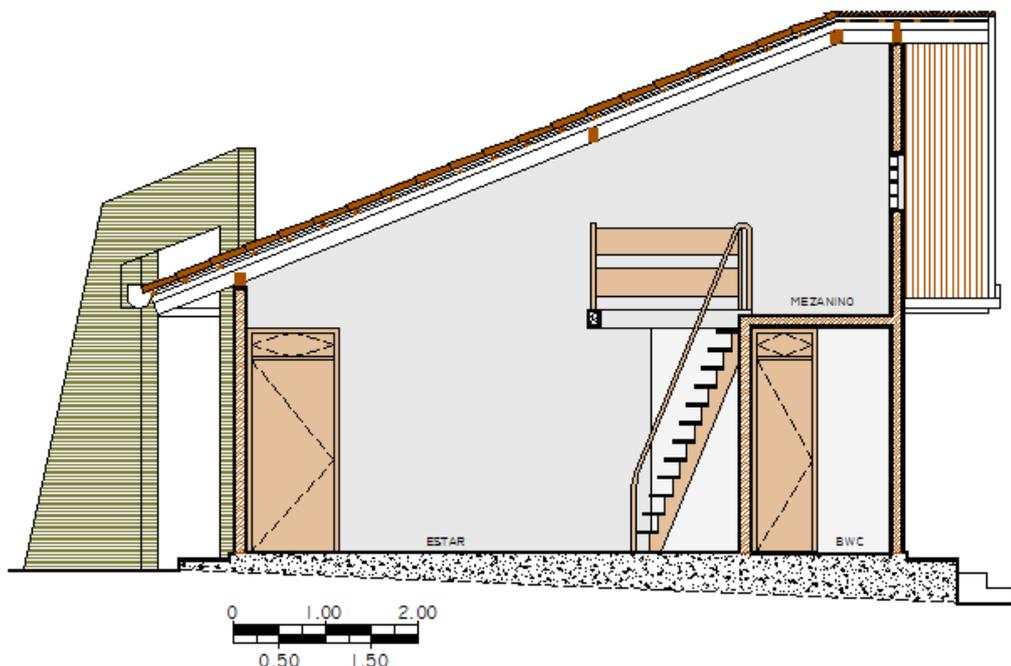


Figura 18- Corte longitudinal da sala e mezanino

O acesso principal à sala se dá por uma porta com dimensões de 0,80 por 2,10 metros, orientada a sul, que permite comunicação com um terraço coberto. O outro acesso (secundário) acontece por vão livre, com dimensões de 0,90 x 2,40 metros, que possibilita acesso à cozinha. Este vão foi isolado pelo lado da sala com uma lona plástica na cor preta e, pelo lado da cozinha, com placas de isopor com espessura de 30 mm, como apresentado na Figura 19. A finalidade deste isolamento foi restringir ao máximo a infiltração de ar e as trocas de calor entre os ambientes da sala e da cozinha.



Figura 79- Vedação do vão de comunicação entre sala e cozinha

O acesso ao mezanino se dá pela escada de madeira localizada em uma lateral da sala; do interior do mezanino se tem uma visão da sala de vez que não existe fechamento em alvenaria; posteriormente, esta abertura será guarnecida com guarda-corpo vazado em madeira.

As aberturas de ventilação da sala compreendem 02 janelas dotadas de 02 folhas com pivôs laterais, em madeira e vidro, uma na parede frontal (leste) e outra na parede lateral direita (norte). Essas esquadrias possuem 02 bandeiras móveis com pivôs horizontais centralizados em sua parte superior. Os conjuntos foram executados em madeira e vidro do tipo pontilhado de 3 mm e medem 1,20 por 1,40 metros, sendo que as bandeiras possuem 30 cm de altura - ambos foram assentados a uma altura de 1,00 m do piso (peitoril).

A captação de ar do mezanino se dá por meio do vão onde será instalado o guarda-corpo; neste ambiente existem duas aberturas para exaustão do ar localizadas nas fachadas norte e oeste, com dimensões de 1,20 por 0,60 metros executadas em elementos vazados em concreto pré-moldado, que foram assentados resguardando um peitoril de 1,00 m; enfim, os materiais empregados na construção da envoltória da sala e do mezanino seguem a Tabela 19.

Tabela 19- Materiais construtivos empregados nos elementos da envoltória

Ambiente	Elemento	Material
Sala	Piso	Contrapiso em concreto, argamassa colante do tipo ACII, revestimento cerâmico esmaltado branco e rejunte flexível.
	Paredes	Alvenaria em tijolos cerâmicos de 8 furos, assentados a singelo, chapiscada e rebocada, revestidas com massa acrílica (até 1,00 m de altura) e corrida e pintada com 02 demãos de tinta PVA na cor branca, exceto na parede oeste, na cor areia.
	Coberta	Estrutura em madeiramento aparente com cobertura em telhas cerâmicas do tipo romana na cor natural. Na projeção do mezanino, laje com trilhos em concreto pré-moldado e blocos cerâmicos, chapiscada e rebocada, revestida com massa corrida e pintada com 02 demãos de tinta PVA branca.
Mezanino	Piso	Laje com trilhos em concreto pré-moldado e blocos cerâmicos, com camada de regularização em areia e cimento, argamassa colante do tipo ACII, revestimento cerâmico esmaltado branco e rejunte flexível.
	Paredes	Alvenaria em tijolos cerâmicos de 8 furos, assentados a singelo, chapiscada e rebocada, revestidas com massa corrida e pintada com 02 demãos de tinta PVA na cor branca.
	Coberta	Estrutura em madeiramento aparente com cobertura em telhas cerâmicas do tipo romana na cor natural.

3.4 Instrumentação para coleta e armazenamento de dados

3.4.1 Sistema de aquisição de dados

Para a coleta e armazenamento dos dados das temperaturas de bulbos (seco e úmido), de globo negro e das temperaturas superficiais (externa e interna) de cobertura e parede foi utilizado um sistema de aquisição de dados composto por um datalogger, modelo CR1000 (Campbell Scientific), dotado de uma placa multiplexadora, à qual foram conectados 20 termopares, como se observa na Figura 20.

Os dados armazenados foram acessados por meio do software PC200W integrado ao sistema e apresentados utilizando-se do software Microsoft Excel 2010.

Este sistema foi programado para coletar dados instantâneos de temperatura a cada hora, nos períodos diurno e noturno durante todo o período do experimento, ou seja, 25 dias.

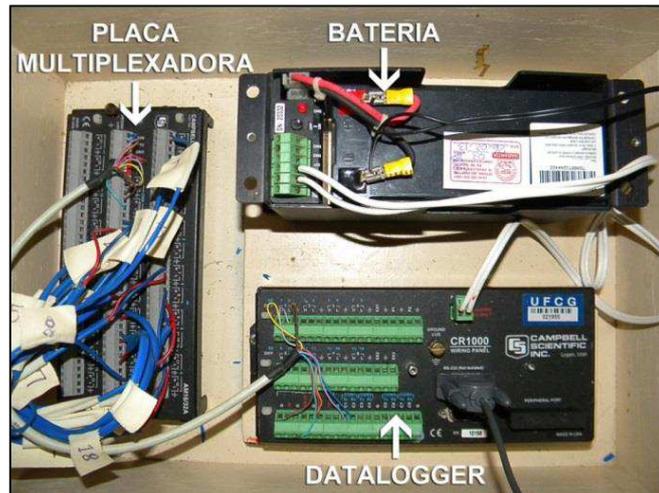


Figura 20- Sistema de aquisição de dados

3.4.2 Medição de temperatura

Os dados de temperatura foram coletados através do uso de 19 termopares do tipo “T” (cobre e constantan), com capacidade para efetuar medições na gama dos -270 a 370 °C, conectados ao sistema de aquisição modelo CR1000, fabricante Campbell Scientific. Este sistema foi programado para coletar dados instantâneos de temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido, temperaturas de globo negro, além de temperaturas superficiais, internas e externas, de paredes e cobertura nos turnos diurno e noturno, durante todo o período experimental.

3.4.2.1 Calibração dos sensores de temperatura

A calibração dos termopares ocorreu em 2 etapas, ou seja, na primeira a temperatura registrada pelos termopares numerados de 1 a 15 foi aferida com a temperatura medida no sensor de uma câmara climática enquanto na segunda os termopares numerados de 16 a 20 foram aferidos com um termopar de referência, já calibrado na etapa anterior.

Na primeira etapa foram utilizados dois sistemas de aquisição de dados, concomitantemente; um deles, ao qual foram conectados os termopares de 1 a 15, foi o mesmo utilizado durante todo o período experimental (CR1000). O

outro, composto por sensor de temperatura e umidade foi instalado em uma câmara climática, conectado a um microcontrolador, modelo MT530 (Full Gauge), com comunicação serial para conexão com o software Sitrad, o qual permitiu o gerenciamento dos dados de temperatura dentro desta câmara.

Os 15 termopares foram distribuídos dentro da câmara climática em local o mais próximo possível do sensor de temperatura e umidade. Ambos os sistemas foram programados para registrar simultaneamente temperaturas a cada 10 minutos, durante 3 dias; as equações de calibração foram produto da diferença média entre as temperaturas registradas em cada um dos termopares e no sensor da câmara.

Na segunda etapa, já no meio experimental, foi utilizado o sistema de aquisição CR1000, ao qual foram conectados todos os 20 termopares; foram espalhados, então, os 5 termopares (do 16 ao 20), o mais próximo possível do termopar de referência (T5 cor) já calibrado na etapa posterior. As equações de calibração resultaram da diferença média entre as temperaturas registradas em cada um dos termopares numerados de 16 a 20 e aquelas registradas pelo termopar referência. Na Tabela 20 são apresentadas as equações de correção aplicadas às temperaturas registradas pelos termopares.

Tabela 20- Equações de correção aplicadas aos dados de temperatura registrados nos respectivos termopares

Termopar	Temp. média Câmara climática (°C)	Temp. média Termopar (°C)	Equações de correção
1	23,50	13,47	T1 cor= Termopar1 + 10,03
2	23,50	13,45	T2 cor= Termopar2 + 10,05
3	23,50	13,28	T3 cor= Termopar3 + 10,22
4	23,50	13,36	T4 cor= Termopar4 + 10,14
5	23,50	13,54	T5 cor= Termopar5 + 9,96
6	23,50	13,57	T6 cor= Termopar6 + 9,93
7	23,50	13,63	T7 cor= Termopar7 + 9,87
8	23,50	13,44	T8 cor= Termopar8 + 10,06
9	23,50	13,52	T9 cor= Termopar9 + 9,98
10	23,50	13,33	T10 cor= Termopar10 + 10,17
11	23,50	13,30	T11 cor= Termopar11 + 10,20
12	23,50	13,66	T12 cor= Termopar12 + 9,84
13	23,50	13,37	T13 cor= Termopar13 + 10,13
14	23,50	13,29	T14 cor= Termopar14 + 10,21
15	23,50	13,36	T15 cor= Termopar15 + 10,14

Termopar	Temp. média T5 cor (°C)	Temp. média Termopar (°C)	Equações de correção
16	22,46	12,59	T16 cor= Termopar16 + 9,87
17	22,46	12,61	T17 cor= Termopar17 + 9,85
18	22,46	12,59	T18 cor= Termopar18 + 9,87
19	22,46	12,59	T19 cor= Termopar19 + 9,87
20	22,46	12,50	T20 cor= Termopar20 + 9,96

3.4.2.2 Confecção do globo negro

Os globos negros foram confeccionados em esferas plásticas devidamente pintadas na cor preta com acabamento fosco. Essas esferas foram perfuradas para inserção dos sensores de temperatura; logo após a centralização dos termopares, tais furações foram devidamente fechadas com cola de silicone.

3.4.2.3 Calibração dos globos

Uma vez que os globos utilizados no experimento foram confeccionados em material diferente do recomendado, em plástico ao invés de bronze, fez-se necessária a etapa da calibração dos globos; para tanto, os globos foram pendurados em uma estrutura metálica localizada no centro geométrico da sala, de maneira a estarem todos sujeitos à quantidade equivalente de radiação. Os globos negros em plástico foram posicionados o mais próximo possível do globo negro padrão; a partir dos dados de temperatura, coletados em 03 dias de medições, foram determinadas as equações de calibração para os globos negros em plástico em função do padrão; enfim, as equações de calibração e seus coeficientes de correlação são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21- Equações de calibração para os globos em plástico em função dos globos padrão

Local	Globo	Equação de calibração (Globo plástico x Globo padrão)	Coef. de correlação
Sala	Globo negro plástico 1	$Y = 0,9691x + 0,8387$	$R^2 = 0,9979$
Mezanino	Globo negro plástico 2	$Y = 0,9542x + 1,1374$	$R^2 = 0,9992$

Y é a temperatura final do globo correspondente;
x é a temperatura registrada no interior do globo, ou seja, temperatura medida pelo termopar inserido no globo com sua devida correção.

3.4.2.4 Distribuição dos sensores de temperatura

Dos 20 termopares calibrados 17 foram distribuídos no meio experimental e 03 foram reservados para prováveis eventualidades; a distribuição desses sensores é apresentada na Tabela 22.

Tabela 22- Distribuição dos sensores de temperatura

Local	Termopar		Medição efetuada
	Nº	Nome	
Mezanino	1	TBU_Mz	Temperatura de bulbo úmido
	6	TBS_Mz	Temperatura de bulbo seco
	7	Plt_ex_Mz	Temperatura da parede lateral exterior
	12	Pps_in_Mz	Temperatura da parede posterior interior
	13	Pps_ex_Mz	Temperatura da parede posterior exterior
	14	Plt_in_Mz	Temperatura da parede lateral interior
	15	TGCz_Mz	Temperatura de globo negro
Sala	3	TBU_SI	Temperatura de bulbo úmido
	5	TBS_SI	Temperatura de bulbo seco
	8	Plt_ex_SI	Temperatura da parede lateral exterior
	9	Plt_in_SI	Temperatura da parede lateral interior
	16	Pfr_in_SI	Temperatura da parede frontal interior
	18	Pfr_ex_SI	Temperatura da parede frontal exterior
	20	TGNg_SI	Temperatura de globo negro
Cobertura	2	Cob_sup	Temperatura da telha superior
	19	Cob_inf	Temperatura da telha inferior
Exterior	11	TBS_ex	Temperatura de bulbo seco
Sem uso	4/10/17	---	-----

O sensor para medição da temperatura de bulbo seco exterior foi localizado a 1,50 m de altura relativa ao nível do terreno, na lateral direita da residência, distando 4m de sua fachada norte; o mesmo foi devidamente protegido da incidência de chuvas e radiação solar direta; para tanto, foi fixado no centro do interior de um abrigo meteorológico com aberturas que permitem ventilação natural, conforme mostrado na Figura 21.



Figura 21- Abrigo para sensor de medição da t_{bs} exterior

Uma vara em madeira foi utilizada para permitir a fixação e o afastamento dos termopares e o direcionamento diagonal dos 2 conjuntos compostos por sensores de medição de temperaturas de bulbo, seco e úmido, e de globos negro. Cada conjunto foi localizado no centro geométrico da sala e do mezanino garantindo que cada termopar fosse, isoladamente, nivelado a uma altura de 1,50m em relação ao piso, de acordo com a Figura 22.



Figura 22- Conjuntos de sensores de temperatura, na sala e no mezanino

Os sensores de temperatura superficial localizados no interior dos ambientes foram fixados utilizando-se adesivo do tipo epóxi enquanto aqueles localizados nas superfícies externas de paredes e cobertura foram fixados com 03 camadas de fita isolante recobertas com adesivo do tipo epóxi, como se observa na Figura 23. A finalidade do uso da fita isolante foi minimizar o efeito do fluxo de calor através do adesivo epóxi quando submetido à radiação solar e sua possível interferência na medição das temperaturas superficiais.

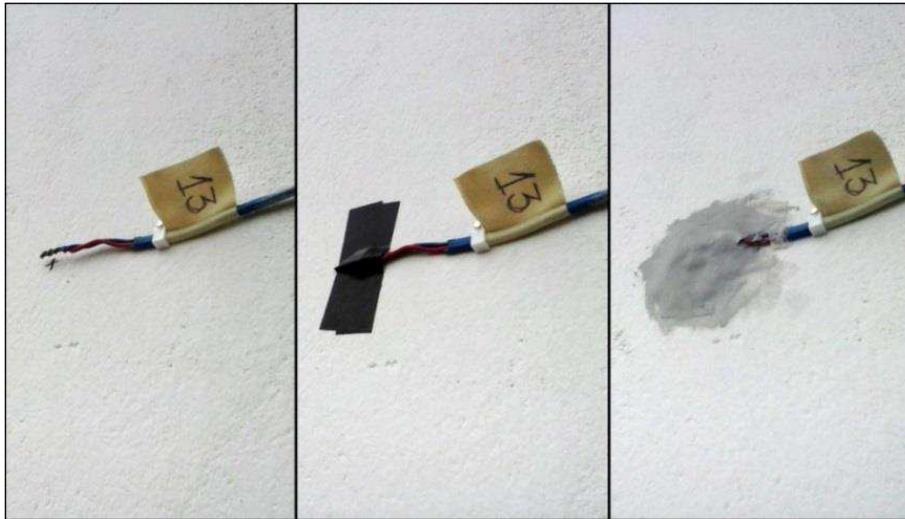


Figura 23- Etapas da fixação dos sensores para medição de temperatura superficial exterior

Os sensores de temperatura de parede foram posicionados a uma altura de 1,50 m relativa ao piso, estando os mesmos fixados no centro da distância entre limites verticais e aberturas de ventilação. Os sensores de temperatura da cobertura foram localizados no centro geométrico do plano inclinado de maior área considerando-se os limites verticais dos ambientes objetos de pesquisa; para cada sensor de medição interna corresponde outro de medição externa; enfim, a distribuição dos sensores de temperatura segue esquema apresentado na Figura 24.



Figura 24- Localização dos sensores para medição de temperatura superficial de paredes

3.4.3 Medição da velocidade do ar

A velocidade do ar, seja no exterior ou no interior dos ambientes selecionados, foi mensurada com o auxílio de anemômetro modelo LM8000 (Lutron), com capacidade de medição na faixa de $0,4$ a 30 m.s^{-1} .

Para cada tratamento as medições internas e externas foram feitas em dias alternados; nos dias de medição foram realizadas coletas de dados às 8 h, 9 h, 16 h e 17 h. Para cada coleta foram capturados, no exterior da edificação, 03 dados de velocidade do ar em locais pré-definidos a aproximadamente 6,00 m de distância do centro da largura das aberturas de ventilação do pavimento térreo. Essas aberturas estão localizadas nas fachadas leste (frontal), norte (lateral direita) e sul (lateral esquerda).

No interior da edificação foram capturados dados de velocidade do ar em pontos localizados a aproximadamente 0,30 m de afastamento dos centros das aberturas de ventilação (captação e exaustão) e próximos aos conjuntos de coleta de dados de temperatura da sala e do mezanino.

Durante o período correspondente aos tratamentos Bab_Cfe e Bab_Cab, no interior da residência os pontos de coleta corresponderam a 0,30 m do centro de uma das bandeiras na metade superior de sua abertura. A Figura 25

ilustra a localização dos pontos de coleta de dados de velocidade do ar no interior e no exterior da área de estudo.

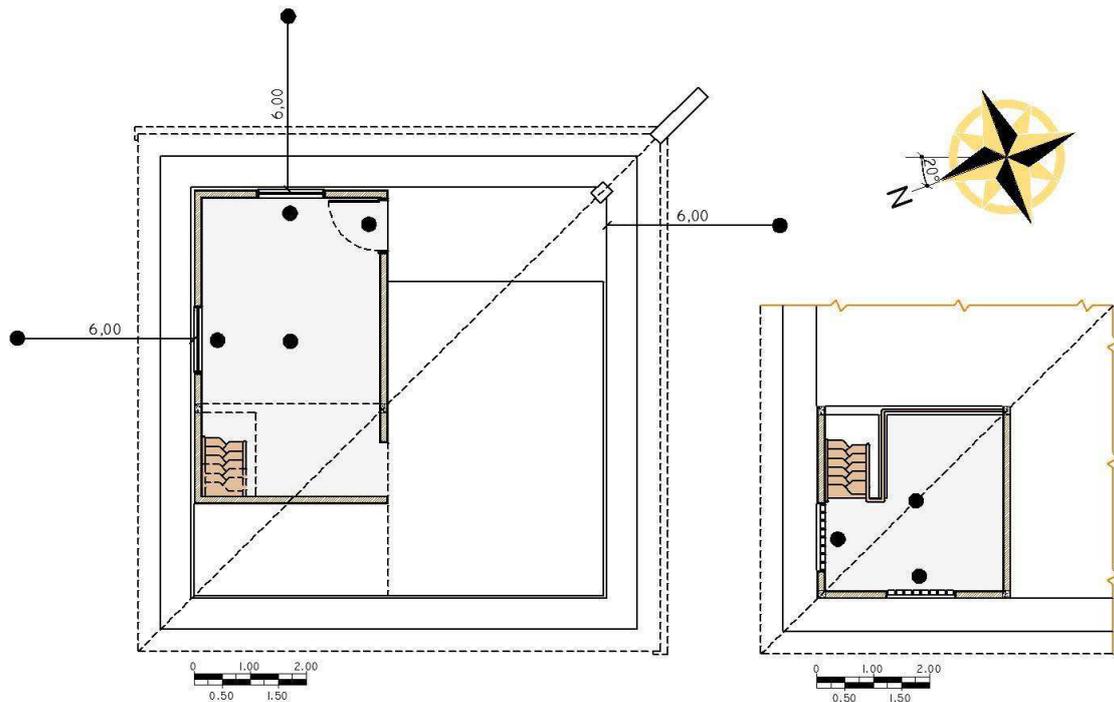


Figura 25- Pontos de medição de velocidade do vento

3.5 Análise da temperatura e da umidade relativa do ar

Para estudo da influência dos padrões adotados para manipulação das aberturas de ventilação sobre a temperatura do ar no interior da edificação, foram traçadas por tratamento as curvas das médias dos dados de temperatura, externa e interna, de bulbo seco (t_{bs} exterior, t_{bs} SALA e t_{bs} MEZANINO).

Para cálculo da umidade relativa (UR) a partir dos dados coletados de t_{bs} e t_{bu} , fez-se uso do software GRAPSI, versão 8.1.1, código aberto desenvolvido para cálculo das propriedades psicrométricas do ar úmido; em seguida foram geradas as curvas referentes a cada tratamento, por ambiente.

3.6 Caracterização do ambiente térmico

A caracterização térmica dos ambientes internos estudados foi feita levando-se em consideração os seguintes índices de conforto: DI/ THI, WBGT, PMV/ PPD e PET. Tais índices foram calculados segundo os procedimentos descritos no subitem 3.6.1; uma vez calculados foram geradas as curvas, por tratamento, para a sala e o mezanino.

3.6.1 Cálculo dos índices térmicos

3.6.1.1 Cálculo do DI e THI

O Índice de Desconforto (DI), originalmente desenvolvido por Thom (1959), tem sido um dos índices mais empregados para determinar o grau de conforto térmico em ambientes não ventilados, sendo dado pela Equação 1, citada anteriormente.

$$DI = 0,72(t_{bs} + t_{bu}) + 40,6 \quad \text{Eq. 1}$$

Na qual:

- DI é o índice de desconforto, em °C;
- t_{bs} é a temperatura de bulbo seco, em °C;
- t_{bu} é a temperatura de bulbo úmido (°C).

Para cálculo do Índice de Temperatura e Umidade (THI), desenvolvido por Fanger (1972) e baseado em Thom, utilizou-se da Equação 2 - já mencionada neste trabalho e que envolve dados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa.

$$THI = t_{bs} - (0,55 - 0,0055 \cdot UR) \cdot (t_{bs} - 14,5) \quad \text{Eq. 2}$$

Na qual:

- THI* é o índice de temperatura e umidade, em °C;
t_{bs} é a temperatura de bulbo seco, em °C;
UR é a umidade relativa, em %.

As faixas interpretativas adotadas para DI e THI foram, respectivamente, aquelas já apresentadas nas Tabelas 06 e 07.

Para cálculo de DI e THI utilizou-se de planilha eletrônica elaborada a partir do software Microsoft Excel versão 2010.

3.6.1.2 Cálculo do WBGT

O cálculo do Índice de Temperatura de Bulbo Úmido e Globo (WBGT) foi realizado para ambientes internos por meio da Equação 3, citada no subitem 2.2.3.2, conforme proposto pela NR 15 (BRASIL, 1978).

$$WBGT = 0,7t_{bu} + 0,3t_{gn} \quad \text{Eq. 3}$$

Na qual:

- WBGT* é o índice de temperatura de bulbo úmido e globo (°C);
t_{bu} é a temperatura de bulbo úmido natural (°C);
t_{gn} é a temperatura de globo negro (°C).

Os limites de tolerância para exposição ao calor em regime de trabalho intermitente utilizados foram os propostos pela NR 15 (BRASIL, 1978), já apresentados na Tabela 08.

Em paralelo foram adotados também os valores referenciais para ambientes quentes sugeridos pela ISO 7243 (ISO, 1989), disponíveis na Tabela 09.

Para o cálculo do WBGT foi utilizada planilha eletrônica elaborada a partir do software Microsoft Excel versão 2010.

3.6.1.3 Cálculo do PMV/PPD

Para cálculo do índice PMV/PPD fez-se uso de uma ferramenta multi-plataforma livre, baseada na Web, para cálculos de conforto térmico de acordo com o Padrão ASHRAE 55, desenvolvida na Universidade da Califórnia, em Berkeley (TYLER et al., 2013).

Como dados de entrada foram utilizados: taxa metabólica (M) com base na Tabela 03; isolamento do vestuário (I_{cl}) baseado na Tabela 04; dados coletados de temperatura de bulbo seco (t_{bs}); temperatura radiante média (t_{rm}); pressão parcial de vapor de água (p_a) e velocidade do ar (v).

Para cálculo da t_{rm} , definiu-se, inicialmente, o coeficiente de troca de calor por convecção, por meio das Equações 15 e 16 que seguem para convecção natural e forçada, respectivamente.

$$h_c = 1,4 \cdot \left[\frac{(t_{gn} - t_{bs})}{d} \right]^{0,25} \quad \text{Eq. 15}$$

$$h_c = 6,3 \cdot \frac{v_{ar}^{0,6}}{d^{0,4}} \quad \text{Eq. 16}$$

Nas quais:

- h_c é o coeficiente de troca de calor por convecção, em $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$;
- t_{gn} é a temperatura de globo negro, em $^\circ C$;
- t_{bs} é a temperatura de bulbo seco, em $^\circ C$;
- d é o diâmetro do globo negro, em m;
- v_{ar} é a velocidade do ar, em $m \cdot s^{-1}$.

Utilizou-se o coeficiente de troca de calor por convecção para definir qual a equação a ser adotada no cálculo da t_{rm} . Desta forma, quando $v_{ar} > 0$, a equação escolhida entre a de convecção natural (Equação 17) e de convecção forçada (Equação 18), foi aquela que apresentou o maior resultado para h_c . Quando $v_{ar} = 0$ iniciou-se o cálculo de t_{rm} escolhendo a equação de convecção natural uma vez que neste experimento não foi utilizada ventilação forçada.

$$t_{rm} = \left\{ (t_{gn} + 273)^4 + 0,25 \cdot \frac{10^8}{\varepsilon} \cdot \left[\frac{(t_{gn} - t_{bs})}{d} \right]^{0,25} \cdot (t_{gn} - t_{bs}) \right\}^{0,25} - 273 \quad \text{Eq. 17}$$

$$t_{rm} = \left[(t_{gn} + 273)^4 + 1,1 \cdot \frac{10^8 \cdot v_{ar}^{0,6}}{\varepsilon \cdot d^{0,4}} \cdot (t_{gn} - t_{bs}) \right]^{0,25} - 273 \quad \text{Eq. 18}$$

Nas quais:

- h_c é o coeficiente de troca de calor por convecção, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;
- t_{gn} é a temperatura de globo negro, em $^\circ\text{C}$;
- ε é a emissividade do corpo negro;
- t_{bs} é a temperatura de bulbo seco, em $^\circ\text{C}$;
- d é o diâmetro do globo negro, em m;
- v_{ar} é a velocidade do ar, em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Para cálculo da pressão parcial de vapor de água (p_a), a partir dos dados coletados de t_{bs} e t_{bu} , fez-se uso do software GRAPSI 7.0 (código aberto), desenvolvido para cálculo das propriedades psicrométricas do ar úmido.

Visto que a edificação em estudo durante o período experimental se encontrava desabitada, optou-se por calcular PMV e PPD para duas situações:

1. Metabolismo para pessoas sentadas e relaxadas ($M= 1 \text{ met}$) e isolamento de vestimentas compridas e flaneladas ($I_{cl}= 0,9 \text{ clo}$);
2. Metabolismo para pessoas em pé realizando atividades de média intensidade ($M= 2 \text{ met}$) e isolamento de vestimentas leves normais de trabalho ($I_{cl}= 0,5 \text{ clo}$).

3.6.1.4 Cálculo do PET

Para cálculo do índice PET foi utilizado o software Rayman 1.2, de uso livre, desenvolvido pelos professores Rutz, Matzarakis e Mayer, da Universidade de Freiburg, Alemanha.

Além dos critérios considerados para cálculo de PMV e PPD, outros parâmetros foram definidos para viabilizar o cálculo de PET; para isto foram

adotadas as características pessoais do homem e da mulher padrão recomendadas pela ISO 8996 (ISO, 2004):

- Homem padrão: indivíduo com 30 anos de idade pesando 70 kg e medindo 1,75 m de altura;
- Mulher padrão: pessoa com 30 anos de idade pesando 60 kg e medindo 1,70 m de altura.

3.7 Avaliação do desempenho térmico

Para avaliação do desempenho térmico da edificação se utilizaram o método por medição e o simplificado, conforme preconiza a NBR 15575:1 (ABNT, 2013). No método por medição comparou-se a temperatura mínima do ar no interior da edificação com a temperatura mínima do ar no exterior da edificação para cada um dos cinco tratamentos, a fim de verificar o atendimento à exigência constante da norma citada. No método simplificado foram calculadas as propriedades térmicas dos fechamentos para verificação do atendimento aos requisitos e critérios para os sistemas de vedação e cobertura definidos pela NBR 15575:4 (ABNT, 2013) e NBR 15575:5 (ABNT, 2013). Adicionalmente, verificou-se o atendimento às recomendações constantes na NBR 15220:3 (2005).

3.7.1 Cálculo das propriedades térmicas dos fechamentos

Em referência ao cálculo das propriedades térmicas dos fechamentos verticais e horizontais, foram seguidos os procedimentos estabelecidos pela NBR 15220:2 (ABNT, 2005) enquanto para os fechamentos verticais foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 23.

Tabela 23- Parâmetros adotados para cálculo das propriedades térmicas de paredes

Elemento	Parâmetro
• Alvenaria em tijolo cerâmico	Densidade aparente (ρ)= 1600 kg.m ⁻³
	Condutividade (λ)= 0,90 W.m ⁻¹ .°C ⁻¹
	Calor específico= 0,92 kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹
• Argamassa comum e reboco interno e externo	Densidade aparente (ρ)= 2000 kg.m ⁻³
	Condutividade (λ)= 1,15 W.m ⁻¹ .°C ⁻¹
	Calor específico (c)= 1 kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹
• Reboco interno e externo	Espessura da camada (e)= 0,025 m
• Junta vertical e horizontal	Espessura da camada (e)= 0,01 m
• Tijolo cerâmico	Comprimento= 0,19 m
	Largura= 0,09 m
	Altura= 0,19 m
	Comprimento do furo= 0,035 m
	Largura do furo= 0,03 m
	Total de furos no comprimento= 4 un
	Total de furos na largura= 2 un
• Pintura externa (branca)	Absortância (α)= 0,2

Quanto à cobertura, foram adotados os valores propostos na NBR 15220:2 (ABNT, 2005), para absortância e propriedades térmicas de coberturas em telha cerâmica, com espessura igual a 0,01 m, sem presença de forro, conforme Tabela 24.

Tabela 24- Valores adotados para absortância e propriedades térmicas da cobertura

Variável	Símbolo	Valor
Absortância da telha cerâmica	α	0,75
Propriedade térmica		
Transmitância térmica	U	4,55 W.m ⁻² .K ⁻¹
Capacidade térmica total	C _T	18,00 kJ.m ⁻² .K ⁻¹
Atraso térmico	ϕ	0,30 horas

O valor do fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da ZB08 (FT) foi calculado utilizando-se a Equação 19 e assumindo a altura da abertura em dois beirais opostos (h) igual a 5 cm.

$$FT = 1,17 - 1,07 \cdot h^{-1,04} \quad \text{Eq. 19}$$

3.7.1.1 Resistência térmica total (R_T)

A resistência térmica da parede de superfície a superfície (R_t) foi calculada pela Equação 20.

$$R_t = \frac{A_a + A_b + A_c}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \frac{A_c}{R_c}} \quad \text{Eq. 20}$$

Na qual:

R_t é a resistência térmica de superfície a superfície da parede, em $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$;

A_a é a área da seção A, em m^2 ;

A_b é a área da seção B, em m^2 ;

A_c é a área da seção C, em m^2 ;

R_a é a resistência térmica de superfície a superfície para a seção A, em $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$;

R_b é a resistência térmica de superfície a superfície para a seção B, em $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$;

R_c é a resistência térmica de superfície a superfície para a seção C, em $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

A resistência térmica das seções A, B e C (R_a , R_b e R_c) foi calculada com base nas Equações 21 a 23, apresentadas abaixo:

$$R_a = \frac{e_{pintura}}{\lambda_{pintura}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{massa}}{\lambda_{massa}} + \frac{e_{pintura}}{\lambda_{pintura}} \quad \text{Eq. 21}$$

$$R_b = \frac{e_{pintura}}{\lambda_{pintura}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{tijolo}}{\lambda_{tijolo}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{massa}}{\lambda_{massa}} + \frac{e_{pintura}}{\lambda_{pintura}} \quad \text{Eq. 22}$$

$$R_c = \frac{e_{pintura}}{\lambda_{pintura}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{tijolo}}{\lambda_{tijolo}} + R_{car} + \frac{e_{tijolo}}{\lambda_{tijolo}} + R_{car} + \frac{e_{tijolo}}{\lambda_{tijolo}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{massa}}{\lambda_{massa}} + \frac{e_{pintura}}{\lambda_{pintura}} \quad \text{Eq. 23}$$

Nas quais:

- R é a resistência térmica da seção, em $m^2.K.W^{-1}$;
 R_{ca} é a resistência da câmara de ar, em $m^2.K.W^{-1}$;
 e é a espessura da camada, em m;
 λ é a condutividade térmica do material, em $W.m^{-2}.K^{-1}$.

Desconsiderou-se a resistência térmica das camadas de massa e pintura visto que suas espessuras, ainda que em várias demãos, são muito pequenas; em seguida, calculou-se a resistência térmica total da parede (R_T) por meio da Equação 24.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad \text{Eq. 24}$$

Na qual:

- R_T é a resistência térmica total da parede, em $m^2.K.W^{-1}$;
 R_{se} é a resistência superficial externa da parede, em $m^2.K.W^{-1}$;
 R_t é a resistência térmica de superfície a superfície da parede, em $m^2.K.W^{-1}$;
 R_{si} é a resistência superficial interna da parede, em $m^2.K.W^{-1}$.

3.7.1.2 Transmitância térmica (U)

A transmitância térmica da parede (U), inverso da resistência térmica total da parede, foi calculada com base na Equação 25.

$$U = R_T^{-1} \quad \text{Eq. 25}$$

Na qual:

- U é a transmitância térmica da parede, em $W.m^{-2}.K^{-1}$;
 R_T é a resistência térmica total da parede, em $m^2.K.W^{-1}$.

3.7.1.3 Capacidade térmica (C_T)

A capacidade térmica total da parede (C_T) foi calculada por meio da Equação 26, visto que a mesma foi executada com tijolos cerâmicos de 8 furos.

$$C_T = \frac{A_a + 5.A_b + 4.A_c}{\frac{A_a}{C_a} + \frac{5.A_b}{C_b} + \frac{4.A_c}{C_c}} \quad \text{Eq. 26}$$

Na qual:

- C_T é a capacidade térmica total da parede, em $\text{kJ.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;
- A_a é a área da seção A, em m^2 ;
- A_b é a área da seção B, em m^2 ;
- A_c é a área da seção C, em m^2 ;
- C_a é a capacidade térmica do componente para a seção A, em $\text{kJ.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;
- C_b é a capacidade térmica do componente para a seção B, em $\text{kJ.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;
- C_c é a capacidade térmica do componente para a seção C, em $\text{kJ.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

A capacidade térmica das seções A, B e C (C_a , C_b e C_c) foi calculada baseada nas Equações 27 a 29, respectivamente.

$$C_a = (e.c.\rho)_{reboco} + (e.c.\rho)_{argamassa} + (e.c.\rho)_{reboco} \quad \text{Eq. 27}$$

$$C_b = (e.c.\rho)_{reboco} + (e.c.\rho)_{tijolo} + (e.c.\rho)_{reboco} \quad \text{Eq. 28}$$

$$C_c = (e.c.\rho)_{reboco} + (e.c.\rho)_{tijolo} + C_{car} + (e.c.\rho)_{tijolo} + C_{car} + (e.c.\rho)_{tijolo} + (e.c.\rho)_{reboco} \quad \text{Eq. 29}$$

Nas quais:

- C é a capacidade térmica da seção, em $\text{kJ.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;
- C_{car} é a capacidade térmica da câmara de ar, em $\text{kJ.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;

- e é a espessura da camada, em m;
 c é a calor específico do material da camada, em $J.kg^{-1}.K^{-1}$;
 ρ é a densidade de massa aparente do material da camada, em $kg.m^{-3}$.

A capacidade térmica da câmara de ar foi considerada nula.

3.7.1.4 Atraso térmico (φ)

O atraso térmico foi estimado tomando-se por base a Equação 30.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2} \quad \text{Eq. 30}$$

Na qual:

- φ é o atraso térmico, em h;
 R_t é a resistência térmica de superfície a superfície da parede, em $m^2.K.W^{-1}$;
 B_1 é dado pela Equação 31.

$$B_1 = 0,226 \frac{B_o}{R_t} \quad \text{Eq. 31}$$

Na qual:

- R_t é a resistência térmica de superfície a superfície da parede, em $m^2.K.W^{-1}$;
 B_o é dado pela Equação 32.

$$B_o = C_T - C_{t\ ext} \quad \text{Eq. 32}$$

Na qual:

- C_T é a capacidade térmica total da parede, em $kJ.m^{-2}.K^{-1}$;
 $C_{t\ ext}$ é a capacidade térmica da camada externa da parede, em

$\text{kJ.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;

B_2 é dado pela Equação 33 (obs.: considerar B_2 nulo, caso seja negativo).

$$B_2 = 0,205 \cdot \frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R_t} \cdot (R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10}) \quad \text{Eq. 33}$$

Na qual:

λ é a condutividade térmica da camada externa da parede, em $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;

ρ é a densidade de massa aparente do material da camada externa da parede, em kg.m^{-3} ;

c é o calor específico do material da camada externa da parede, em $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;

R_t é a resistência térmica de superfície a superfície da parede, em $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$;

R_{ext} é a resistência térmica da camada externa da parede, em $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$.

3.7.1.5 Fator de ganho de calor solar (FS_o)

O fator solar de elementos opacos foi calculado pela Equação 34.

$$FS_o = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} \quad \text{ou} \quad FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha \quad \text{Eq. 34}$$

Na qual:

FS_o é o fator de solar de elementos opacos, em %;

U é a transmitância térmica da parede, em $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;

α é a absorvância à radiação solar em função da cor;

R_{se} é a resistência superficial externa (admitida constante e igual a 0,4), em $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$.

Como as paredes externas foram pintadas na cor branca, considerou-se $\alpha=0,2$.

3.8 Calibração do modelo computacional

3.8.1 Modelo de referência

Considerando a grande quantidade de dados de entrada e a complexidade do processo de modelagem, optou-se por obedecer ao procedimento metodológico proposto por Lima (s.d.) para desenvolvimento do modelo de referência; no processo de calibração alguns parâmetros sofreram alterações. De forma geral, o modelo inicial foi gerado partindo-se das configurações listadas a seguir.

Configuração do sítio:

Na etapa inicial foram definidas informações referentes ao sítio, adotando-se valores de latitude, longitude e altitude constantes nos subitens 3.1 e 3.2., além do arquivo climático³ (formato epw) para a cidade de Campina Grande, elaborado a partir de dados horários, registrados em estações do INMET, entre os anos 2000 e 2010. Este arquivo encontra-se disponível para download no site do Laboratório de Eficiência energética em Edificações-LabEEE, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Optou-se pelos dados de coeficientes de pressão correspondentes à exposição normal aos ventos (*exposure to wind: normal*). As temperaturas de chão para os 12 meses do ano foram ajustadas subtraindo-se 2 °C das temperaturas médias mensais externas, conforme sugerido no manual do software.

Construção da geometria:

Na etapa correspondente à modelagem tridimensional da edificação foram criados 02 blocos (*blocks*), sendo um representativo do pavimento térreo e o outro do mezanino; o primeiro bloco foi subdividido em 4 zonas (*zones*): sala,

³ Esta nomenclatura é aquela constante no site do LabEEE, apesar do arquivo em questão ter sido gerado a partir de dados coletados em período menor que 30 anos.

quarto, cozinha e bwc e o segundo bloco criado a partir de um telhado inclinado ocupado com duas águas (*pitched roof, gable roof, roofspace occupied*) composto por 5 zonas: sala, mezanino, quarto, cozinha e terraço (Figura 26).

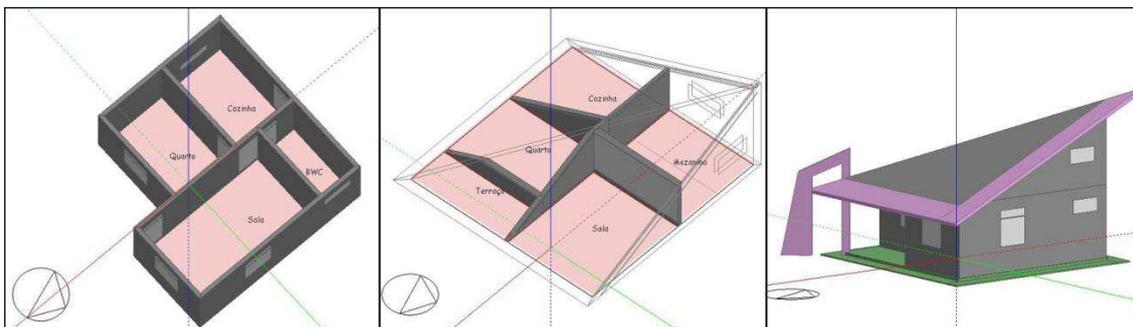


Figura 26- Definição das zonas do pavimento térreo, do mezanino e volumetria do modelo final
Fonte: Gerada pelo DesignBuilder, versão 3.2.0.073 (educacional)

Foram concebidas aberturas não operáveis (*holes*) no teto de cada ambiente do térreo, exceto bwc, a fim de permitir a mesclagem da zona do piso inferior com a sua correspondente no telhado (*merge zones by selection*); outra abertura deste tipo foi inserida na partição que divide sala de mezanino; enfim, lançou-se mão desses recursos para viabilizar a delimitação dos ambientes de sala e mezanino em zonas distintas.

Beirais, calçadas e piso do terraço foram criados a partir de elementos do tipo *component blocks*.

Para cada esquadria localizada na fachada foram criadas duas aberturas (*external windows*), uma referente às janelas e a outra às bandeiras visto que os padrões de manipulação estabelecidos preveem movimentos independentes e percentuais de abertura diferenciados. Todas foram dimensionadas e localizadas segundo medidas reais de afastamento para paredes e piso. Para a modelagem dos combogós fez-se uso da opção *vent* que possibilita inserir vãos ao longo de toda a abertura de ventilação.

Configuração do modelo:

Tendo em vista os horários definidos para abertura (8:00 h) e fechamento (17:00 h) das esquadrias, utilizou-se a opção *typical workday*, cuja

abordagem é de fácil configuração porém menos flexível que a outra disponível (*scheduled*).

A taxa de ventilação natural adotada foi do tipo pré-definido (*natural ventilation: scheduled*) no qual se utilizam taxas fixas de troca de ar modificadas pelos padrões de operação das aberturas. Ativou-se o modelo de fluxo de ar através de aberturas não operáveis e partições virtuais (*model airflow through holes and virtual partitions*).

Modelação dos grupos:

Aba activity

Considerou-se a casa desocupada (*density= 0 people/m²*) ao longo das 24 horas diárias, durante os 7 dias da semana e se definiu o valor zero para a temperatura de controle da ventilação natural (*ventilation setpoint temperatures= 0 °C*), seguindo recomendação constante no manual do DesignBuilder. Todas as opções de ventilação mecânica e outros sistemas de condicionamento, de água quente e equipamentos de escritório foram desabilitadas.

Aba construction

Foram atribuídos materiais para cada componente construtivo em acordo com as especificações daqueles utilizados na construção real e, anteriormente, apresentados no subitem 3.3.1.3. Observou-se a aproximação entre os valores apresentados no subitem 4.4.1.1 e os calculados pelo software para as propriedades térmicas (transmitância, capacidade e atraso térmico) dos elementos de vedação vertical e cobertura e se utilizou a opção de alta permeabilidade ao ar por frestas e rachaduras (*airtightness: very poor*) com taxa de infiltração constante (*constant rate*) em 0,70 ac/h, para a reprodução de suas equivalentes na edificação real.

Aba openings

Todas as esquadrias externas (*windows* e *doors*) consideraram o uso de madeira maciça e vidro incolor de 3mm; as dimensões, quantidade de divisões e localização tentaram ser o mais fiel quanto possível às características do modelo real; as janelas, quando descerradas, permitiram 100% de abertura e as bandeiras apenas 50%; todas as portas para o exterior foram mantidas fechadas enquanto as internas, abertas. Os combogós foram modelados ora abertos ora fechados, conforme necessário; quando abertos, o coeficiente de descarga (*coeficiente of discharge*) utilizado para fluxo de ar foi de 0,70.

Aba HVAC

O modelo HVAC (*HVAC template*) escolhido foi ventilação natural sem aquecimento e sem resfriamento (*natural ventilation - no heating/cooling*). A taxa de ventilação natural (*outside air*) foi definida em 3 renovações por hora. A NBR 15575:1 (ABNT, 2013) estabelece que a taxa de ventilação natural deve variar entre 1 e 5 renovações por hora.

3.8.2 Calibração do modelo final

Os ajustes listados abaixo foram efetuados ao longo do processo de calibração para garantir maior proximidade entre os resultados simulados e os coletados *in loco*, durante o período experimental. Este procedimento foi baseado naquele utilizado por Pereira e Ghisi (2010) para calibração do modelo da Casa Eficiente, desenvolvida pela UFSC/LabEEE.

Ajuste dos períodos de simulação:

De vez que a calibração considerou apenas a variável temperatura do ar, dentre os dados do arquivo climático, foram definidos 5 períodos compostos por 5 dias consecutivos com características de temperaturas mínimas e médias diárias o mais semelhante possível ao período correspondente a cada

tratamento; desta forma, fez-se um ajuste dos períodos de simulação, por tratamento, que seguiu o paralelo apresentado na Tabela 25.

Tabela 25- Ajuste do período de simulação para cada tratamento, em função da t_{bs} exterior

Dados	Tratamentos				
	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab
Período de coleta	28/mai a 01/jun	11/jun a 15/jun	24/jun a 28/jun	17/jun a 21/jun	01/jul a 05/jul
t_{bs} média do período	22,2 °C	22,3 °C	21,8 °C	21,7 °C	21,9 °C
t_{bs} mínima média do período	19,2 °C	20,4 °C	19,1 °C	19,4 °C	19,7 °C
Período de simulação	29/jun a 3/jul	21/mai a 25/mai	7/jul a 11/jul	13/jun a 17/jun	15/jun a 19/jun
t_{bs} média do período	22,2 °C	22,6 °C	21,4 °C	21,6 °C	21,9 °C
t_{bs} mínima média do período	19,1 °C	20,9 °C	19,3 °C	19,8 °C	20,2 °C

Ajuste da transmitância térmica da cobertura:

O valor inicialmente adotado foi aquele sugerido pela NBR 15220:2 (ABNT, 2005), para coberturas em telha de barro sem forro no qual $U= 4,55 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$; no entanto, como a cobertura adotada pela edificação em estudo atende a algumas ressalvas contidas nesta mesma norma e discutidas no subitem 4.4.1.2, foram simulados modelos com transmitância da cobertura de $U= 2,23 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Ajuste da exposição ao vento:

Dados de exposição ao vento foram ajustados considerando-se um terreno com baixa rugosidade (*exposure to wind: exposed*); ao se adotar esta opção, todos os coeficientes de pressão, além dos valores de transmitância térmica calculados pelo software, foram afetados, o que ocorre pois a exposição ao vento modifica o coeficiente de transferência de calor externo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Temperatura de bulbo seco (t_{bs})

Nas Figuras 27 a 31 são apresentadas as curvas geradas por tratamento, a partir das médias, a cada hora, das temperaturas de bulbo seco exterior (t_{bs} exterior) e interior de sala (t_{bs} SALA) e mezanino (t_{bs} MEZ.). Em todas as figuras a zona de conforto aparece indicada. Segundo Xavier (2000), esta zona se encontra limitada entre 23 e 27 °C, quando são consideradas pessoas vestidas com roupas normais de trabalho e desempenhando atividades sedentárias.

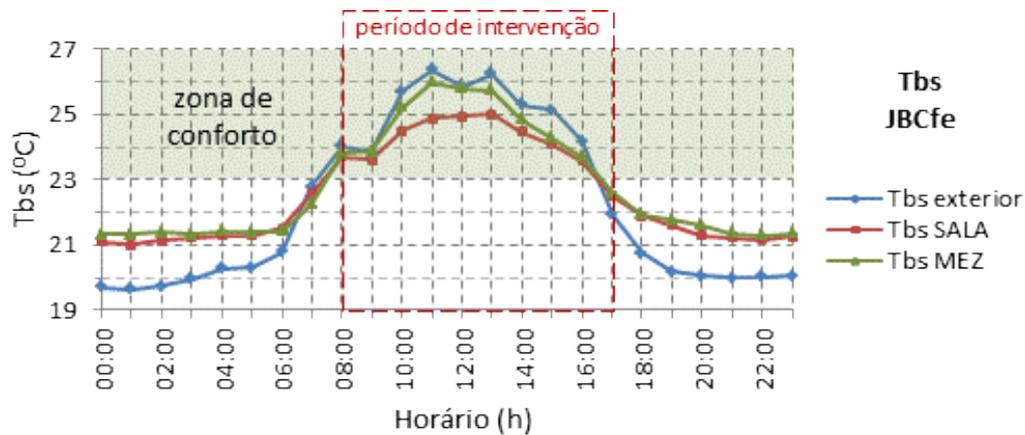


Figura 27- Curvas de t_{bs} exterior, t_{bs} SALA e t_{bs} MEZ, para JBCfe

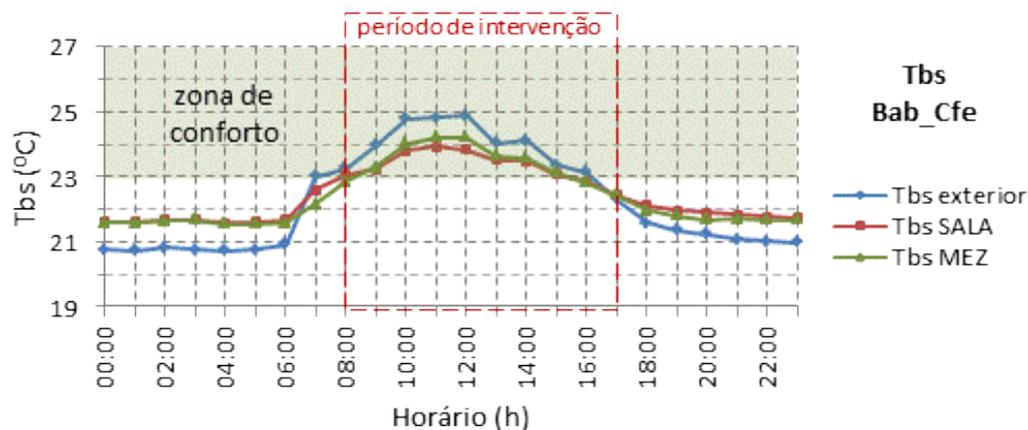


Figura 28- Curvas de t_{bs} exterior, t_{bs} SALA e t_{bs} MEZ, para Bab_Cfe

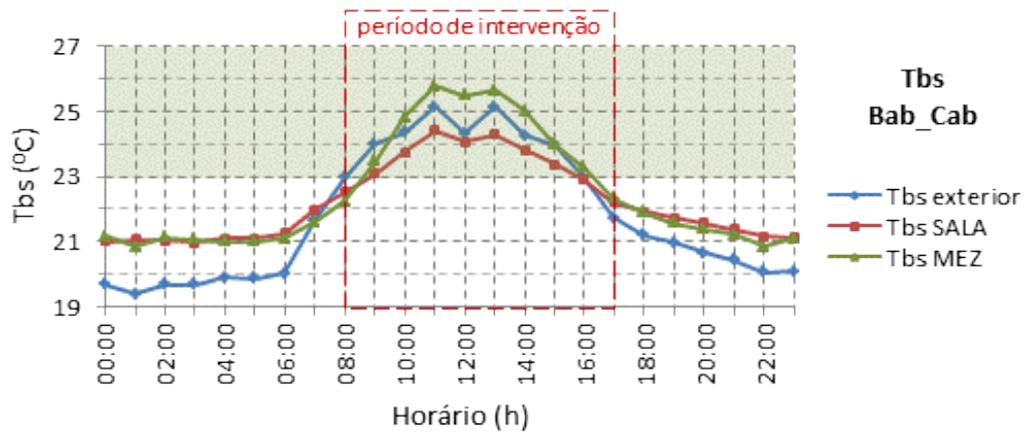


Figura 29- Curvas de t_{bs} exterior, t_{bs} SALA e t_{bs} MEZ, para Bab_Cab

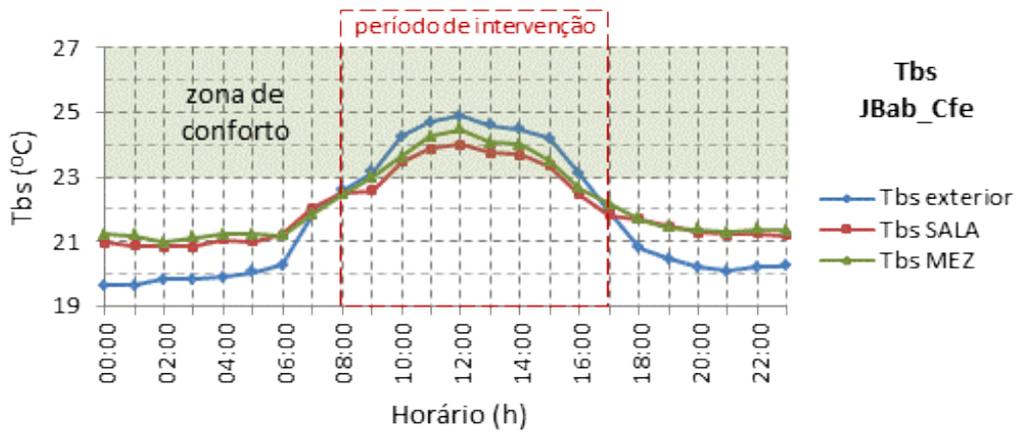


Figura 30- Curvas de t_{bs} exterior, t_{bs} SALA e t_{bs} MEZ, para JBab_Cfe

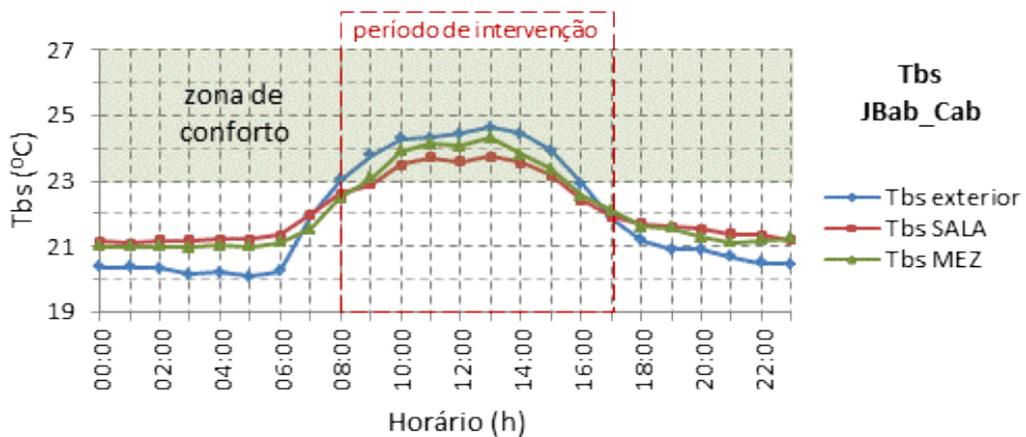


Figura 31- Curvas de t_{bs} exterior, t_{bs} SALA e t_{bs} MEZ, para JBab_Cab

Ao longo de todos os tratamentos, com exceção para o mezanino em Bab_Cab, o comportamento térmico dos ambientes analisados, no que se refere à temperatura do ar, apresenta padrão previsto, com temperatura interna, relativa à externa, maior ao entardecer e à noite e menores durante o dia, cuja ocorrência é devida ao efeito da inércia térmica em que o calor acumulado na envoltória (paredes, esquadrias e cobertura) é, no decorrer do dia, parcialmente transmitido ao interior da edificação, à noite.

A temperatura do ar na sala e no mezanino se manteve, durante o período experimental (meses de inverno) nos cinco tratamentos, dentro da zona de conforto, no intervalo compreendido entre 9:00 h e 15:00 h. Fora desta faixa e independente do padrão de manipulação das aberturas de ventilação adotado, a t_{bs} interna alcançou valores menores que 23 °C, limite inferior da zona de conforto.

Em todos os tratamentos estabelecidos nos períodos compreendidos entre 0:00 h e 7:00 h e entre 17:00 h e 23:00 h, a temperatura do ar na sala e no mezanino é muito próxima, ou seja, em torno dos 21 °C, sendo superior à temperatura do ar exterior. Esta proximidade se deve à pouca radiação solar, grande responsável pela produção de calor e, em parte, à similaridade das condições de ventilação uma vez que todas as aberturas manipuláveis de captação de ar permaneceram fechadas. Ressalta-se que a diferença entre a temperatura interna e a externa foi insuficiente para elevar as temperaturas internas ao patamar de conforto.

Nos tratamentos JCBfe, Bab_Cfe, JBab_Cfe e JBab_Cab, entre 7:00 h e 17:00 h, as temperaturas de sala e mezanino assumiram valores inferiores à temperatura externa mantendo-se, juntamente com essas últimas, na maior parte deste período na zona de conforto.

Na Figura 26 observa-se comportamento térmico diferenciado para a curva de t_{bs} MEZ, na qual os valores apresentados entre 10:00 h e 15:00 h foram superiores aos valores de t_{bs} exterior.

Tal alteração pode ser explicada pela menor diferença de temperatura do ar entre sala e exterior significando que durante o tratamento Bab_Cab, a t_{bs} registrada na sala foi a mais elevada de todo o período experimental quando comparada com a t_{bs} no exterior, conforme apresentado na Tabela 26; somem-

se, a isto, os diferenciais de taxas de ventilação e de fluxo de ar produzidos pelo dimensionamento relativo entre aberturas captadoras e exaustoras do ar.

Tabela 26- t_{bs} média máxima e diferença de temperatura entre interior e exterior para cada tratamento

Dados	Ambientes														
	Exterior					Sala					Mezanino				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Tbs máxima	26,4	24,9	25,1	24,9	24,6	25,0	23,9	24,4	23,9	23,7	26,0	24,2	25,8	24,5	24,3
Diferença para Tbs exterior						-1,4	-1,0	-0,7	-1,0	-0,9	-0,4	-0,7	0,7	-0,4	-0,3
1- JBCfe	2- Bab_Cfe				3- Bab_Cab				4- JBab_Cfe				5- JBab_Cab		

Yoshida (2006) concluiu, utilizando-se de simulações paramétricas, que em habitações unifamiliares com tipologia de múltiplos andares a estratificação do ar induz à maior concentração de ar quente nos andares superiores, o que tende a elevar suas temperaturas internas.

Sadafi et al. (2011) analisaram a influência do “efeito chaminé” sobre o conforto térmico de uma residência, utilizando-se do software ECOTECT; para tanto, testaram 03 alturas de vãos localizados na parte mais alta das paredes de fechamento de um átrio interno cujos resultados revelaram que aberturas de exaustão bem dimensionadas contribuem para minoração da temperatura interna, tanto do átrio quanto das zonas adjacentes.

Desta forma, pode-se inferir que, apesar de não ter sido capaz de provocar um adequado resfriamento do ar interno, o fluxo de ar advindo das aberturas das bandeiras foi suficiente para empurrar a massa de ar mais aquecida da sala em direção às aberturas de exaustão (combogós), localizadas no mezanino concentrando, neste ambiente, maior carga de calor que no período mais quente do dia foi capaz de elevar a temperatura interna a valores superiores à temperatura externa.

4.2 Umidade relativa (UR)

O comportamento das curvas de UR demonstra, em todos os tratamentos, a relação estreita entre esta variável e a temperatura do ar externo, como se observa nas Figuras 32 e 33.

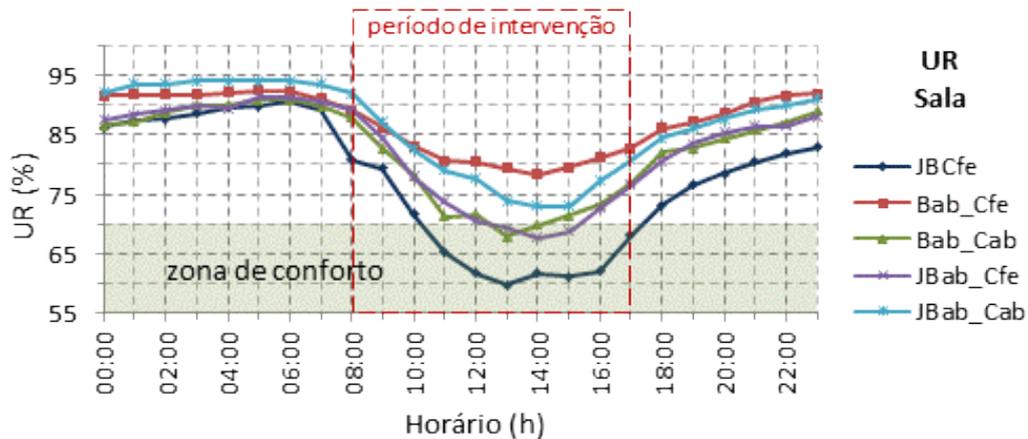


Figura 32- Curvas de UR do ambiente da sala, para os cinco tratamentos

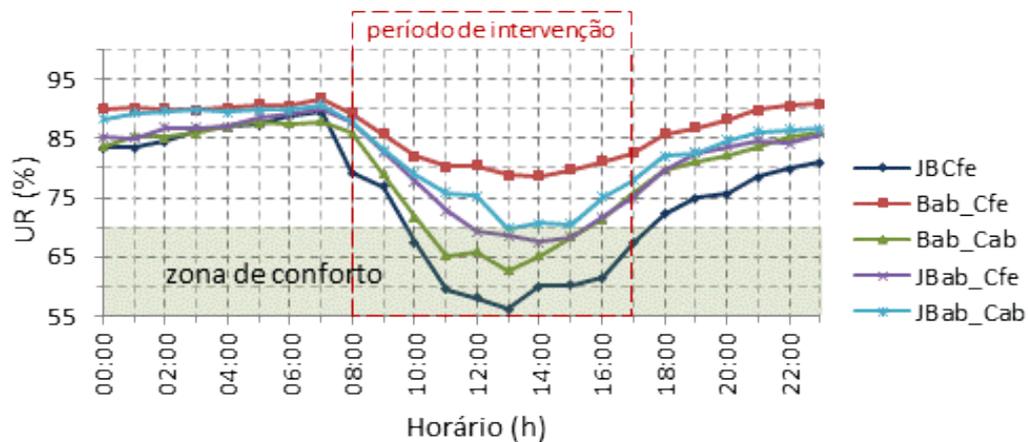


Figura 33- Curvas de UR do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos

Visando análise dos valores médios de umidade relativa interna, adotou-se a faixa proposta por Lamberts e Xavier (2002), segundo os quais a umidade relativa do ar deve variar entre 30% e 70% para reduzir as ocorrências de deficiências respiratórias e de sensações desagradáveis, por excesso ou ausência de suor.

A cada hora os valores de umidade relativa sempre foram superiores para o ambiente da sala, quando comparados aos do mezanino. A UR máxima, bem próxima ao estado de saturação do ar, ocorreu na sala sempre por volta das 5:00 h atingindo 94% enquanto no mezanino, às 7:00 h, chegando a 92%; tal retardo se deve à maior proximidade entre mezanino e cobertura que, por ter sido executada em material cerâmico não esmaltado, é boa absorvedora de água; apenas com o aumento da radiação solar incidente e a consequente

evaporação da água contida nas telhas acontece redução da umidade relativa do ambiente interno adjacente.

Ao longo do tratamento JBCfe a UR permanece durante maior tempo na zona considerada aceitável, tanto na sala (29% do dia) como no mezanino (33% do dia), conforme a Tabela 27, evento que se justifica visto que a temperatura do ar exterior apresentou, no período de aplicação do primeiro tratamento, os valores mais elevados.

Tabela 27- Classificação do ambiente, segunda a UR, para cada ambiente e tratamento

Dados (no período de intervenção)	Sala					Mezanino				
	Tratamentos					Tratamentos				
	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab
UR máxima	81	89	88	89	92	79	89	86	88	88
UR mínima	60	78	70	68	73	56	79	63	67	70
Classificação térmica do ambiente										
Período	% do período / % do dia					% do período / % do dia				
18:00 h às 7:00 h (58% do dia)	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58
Período de intervenção 8:00 h às 17:00 h (42% do dia)	70 / 29		20 / 9	30 / 13		80 / 33		50 / 21	40 / 17	10 / 4
	30 / 13	100 / 42	80 / 33	70 / 29	100 / 42	20 / 9	100 / 42	50 / 21	60 / 25	90 / 38

muito seco (<30%)

aceitável

muito úmido (>70%)

No tratamento Bab_Cab a umidade relativa se manteve na faixa aceitável durante 50% do período de intervenção devido à t_{bs} no mezanino que, neste intervalo, chegou a registrar médias superiores à t_{bs} exterior.

4.3 Índices térmicos

4.3.1 Índice de Desconforto (DI) e de Temperatura e Umidade (THI)

As faixas interpretativas do índice de conforto térmico DI, propostas por Thom (1959), relacionam os limites de conforto às sensações de satisfação ou insatisfação com o ambiente térmico, por parcelas da população. Para que a totalidade da população não apresente desconforto, $DI < 70$ °C; para que a minoria da população sinta incômodo térmico, 70 °C $< DI < 75$ °C; quando a maioria das pessoas se sentir desconfortável, 75 °C $< DI < 79$ °C e, no caso de insatisfação generalizada, $DI > 79$ °C.

Quando submetidos às intervenções por manipulação das aberturas os ambientes da sala e do mezanino são caracterizados, segundo DI, termicamente confortáveis, para todos os tratamentos, haja vista que apenas a minoria da população usuária poderia apresentar algum tipo de desconforto, conforme as Figuras 34 e 35.

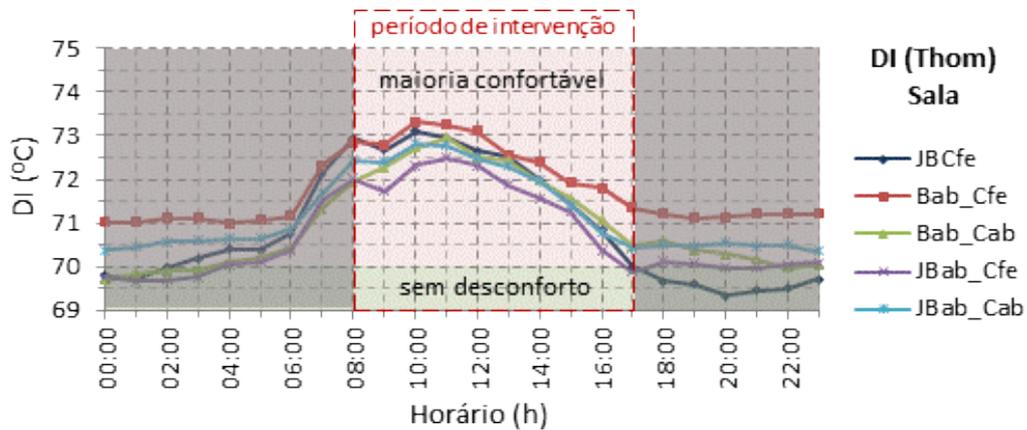


Figura 34- Curvas de DI do ambiente da sala, para os cinco tratamentos

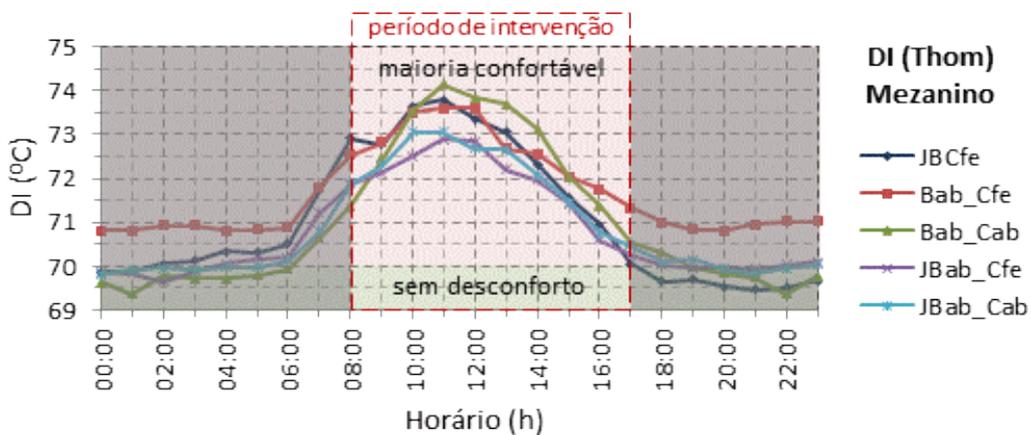


Figura 35- Curvas de DI do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos

Durante o tratamento JBab_Cfe, os dois ambientes analisados apresentaram o melhor comportamento térmico com valor crítico de DI na ordem dos 72 °C, entre 10:00 h e 12:00 h; na sala foi durante a aplicação do tratamento Bab_Cfe que o DI atingiu seu valor máximo de 73,3 °C e no mezanino o DI máximo chegou ao patamar dos 74 °C durante o tratamento Bab_Cab.

Pode-se observar, na Tabela 28 que, de acordo com o Índice de Desconforto de Thom, os ambientes avaliados seriam considerados

confortáveis pela maioria dos usuários durante todo o período de intervenção, independente do tratamento.

Tabela 28- Valores médios (máximo e mínimo) e classificação do ambiente segundo DI

Dados (no período de intervenção)	Sala					Mezanino				
	Tratamentos									
	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab
DI máximo	73,1	73,3	73,0	72,5	72,8	73,8	73,6	74,2	72,9	73,1
DI mínimo	70,0	71,3	70,5	69,9	70,4	70,1	71,3	70,5	70,2	70,4
Período	Classificação térmica do ambiente									
	% do período / % do dia					% do período / % do dia				
	18:00 h às 7:00 h (58% do dia)	57 / 33		29 / 16	29 / 16		57 / 33		78 / 46	50 / 29
Período de intervenção 8:00 h às 17:00 h (42% do dia)	43 / 25	100 / 58	71 / 42	71 / 42	100 / 58	43 / 25	100 / 58	21 / 12	50 / 29	50 / 29
				10 / 4						
	100 / 42	100 / 42	100 / 42	90 / 38	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42
	<div style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #d9ead3; border: 1px solid black;"></div> todos confortáveis (<70)					<div style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #d9ead3; border: 1px solid black;"></div> maioria confortável (70<DI<75)				

Viana (2011) analisou a influência do sentido de implantação e da presença de forro de cobertura sobre o conforto térmico em habitação de interesse social na cidade de Campina Grande, utilizando de protótipo em escala reduzida; no seu experimento durante o inverno, a autora registrou DI mínimo de 67 °C e DI máximo de 83 °C, para o pavimento superior quando da ausência de forro de cobertura indicando conforto nas horas mais frias do dia e insatisfação generalizada com o ambiente interno, nas mais quentes.

Com base nos registros feitos pela autora supracitada, supõe-se que a tipologia de edificação, por este trabalho analisada, se mostra mais adequada à realidade climática de Campina Grande; mesmo assim, conclusões quanto à viabilidade desta tipologia frente às tradicionalmente adotadas, pressupõem análise de dados coletados simultaneamente.

Por se tratar de um índice determinado para parametrizar condições de temperatura interna nas quais os sistemas de climatização (aquecimento ou resfriamento) devem ser acionados, o DI apresenta uma limitação na classificação do ambiente térmico pois não estabelece faixas para avaliar se o desconforto é consequência da sensação de frio ou de calor.

Os intervalos interpretativos propostos por Fanger (1972), para o Índice de Temperatura e Umidade (THI), permitem identificar as causas do possível desconforto; para isto, o autor utilizou uma escala simétrica com eixo central na zona de conforto quando 22 °C<THI<25 °C. Na medida em que os valores do índice caem, o desconforto, causado pelo frio, se agrava; assim, para 22

$^{\circ}\text{C} > \text{THI} > 19^{\circ}\text{C}$, o ambiente é classificado como ligeiramente frio e, para $19^{\circ}\text{C} > \text{THI} > 16^{\circ}\text{C}$, como frio moderado.

Nas Figuras 36 e 37 são apresentadas as curvas de THI, para sala e mezanino, respectivamente.

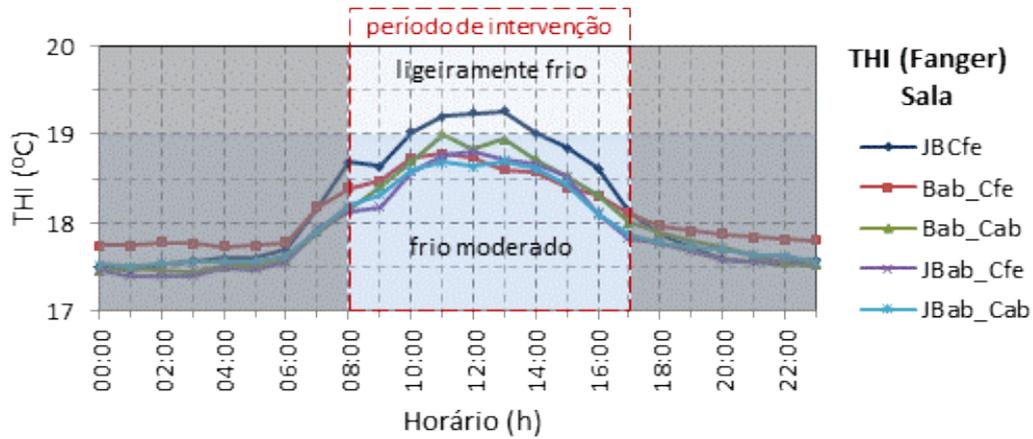


Figura 36- Curvas de THI do ambiente da sala, para os cinco tratamentos

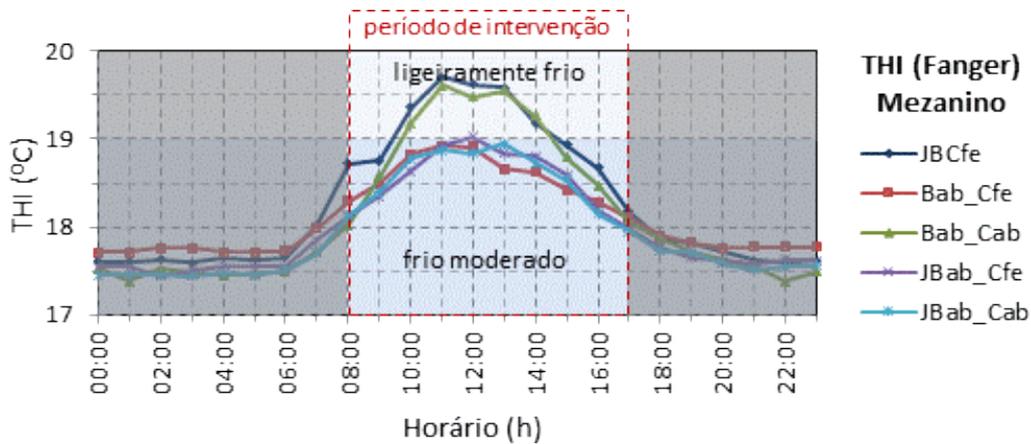


Figura 37- Curvas de THI do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos

A partir de THI pode-se deduzir que a parcela da população insatisfeita com o ambiente térmico é decorrente das condições de frio.

No caso da sala apenas no tratamento JBCfe, no qual as aberturas de ventilação (captadoras ou extratoras) foram mantidas fechadas, THI atingiu a zona de classificação ligeiramente frio por metade do período de intervenção, como referido na Tabela 29.

Tabela 29- Valores médios (máximo e mínimo) e classificação do ambiente segundo THI

Dados (no período de intervenção)	Sala					Mezanino				
	Tratamentos					Tratamentos				
	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab
THI máximo	19,3	18,8	19,0	18,8	18,7	19,7	18,9	19,6	19,0	18,9
THI mínimo	18,1	18,1	18,0	17,8	17,9	18,2	18,1	18,0	18,0	18,0
Período	Classificação térmica do ambiente									
	% do período / % do dia					% do período / % do dia				
	18:00 h às 7:00 h (58% do dia)	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58
Período de intervenção 8:00 h às 17:00 h (42% do dia)	50 / 21		10 / 4			50 / 21		50 / 21	10 / 4	
	50 / 21	100 / 42	90 / 38	100 / 42	100 / 42	50 / 21	100 / 42	50 / 21	90 / 38	100 / 42
	ligeiramente frio (<19THI<22)					frio moderado (16<THI<19)				

No mezanino, durante JBCfe e Bab_Cab, THI indica ambiente mais agradável com menor tempo de desconforto por frio; todos os outros tratamentos (Bab_Cfe, JBab_Cfe e JBab_Cab) apresentaram comportamento de THI semelhante.

Embora os índices DI e THI considerem a influência das mesmas variáveis ambientais, temperatura e umidade do ar, sendo o segundo índice baseado no primeiro, ressalta-se que os resultados apresentados refletem a importância por eles creditada a cada variável, isoladamente enquanto para DI, temperatura e umidade do ar possuem a mesma relevância; em THI, a temperatura do ar exerce maior influência relativa que a umidade, motivo pelo qual se tem, em DI, comportamentos tão semelhantes entre as curvas geradas para cada tratamento e em THI comportamento diferenciado sendo mais evidente no mezanino, para os tratamentos JBCfe e Bab_Cab.

Analisando as equações para cálculo de DI e THI e se aplicando metodologia análoga à adotada por Krüger et al. (2012), conclui-se que a cada °C de incremento na t_{bs} corresponde ao acréscimo de 0,45 °C em THI, ao passo que cada porcentagem de aumento na UR equivale a decréscimo de 0,001 °C neste índice.

4.3.2 Temperatura de Bulbo Úmido e de Globo (WBGT)

As faixas interpretativas para WBGT, definidas pela NR 15 (BRASIL, 1978), servem de parâmetro para classificação do ambiente térmico, segundo o

tipo de atividade desempenhada e sua referida taxa metabólica em função do regime de trabalho enquanto os valores referenciais adotados pela ISO 7243 (ISO, 1989) consideram o metabolismo e o grau de aclimação do usuário.

A NR 15 (BRASIL, 1978) classifica os espaços internos em que os valores de WBGT chegam até o limite máximo de 25 °C como tolerável à realização de atividades pesadas em regime de trabalho intermitente.

As curvas de WBGT para a sala e o mezanino apresentadas nas Figuras 38 e 39, respectivamente, se enquadram neste intervalo indicando que tais ambientes são propícios à realização de atividades com taxa metabólica de até 355,4 W.m⁻² (6,1 met), sem grandes prejuízos à produtividade e à saúde do trabalhador.

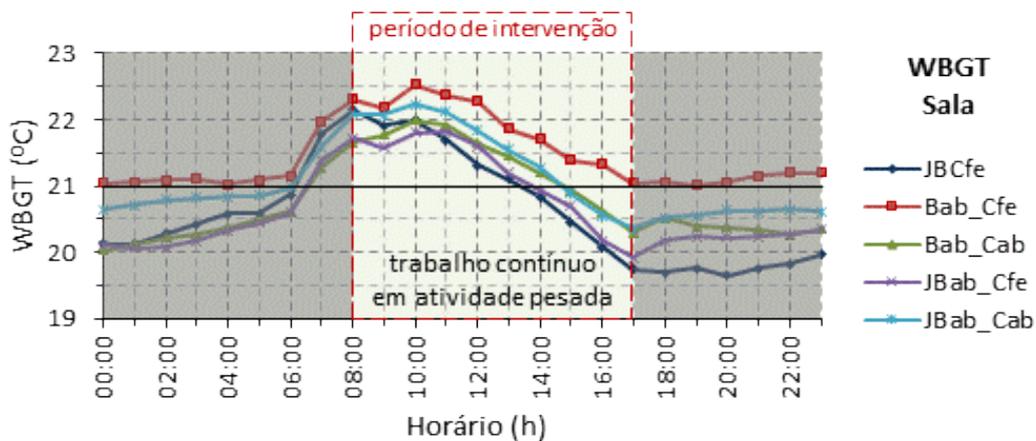


Figura 38- Curvas de WBGT do ambiente da sala, para os cinco tratamentos

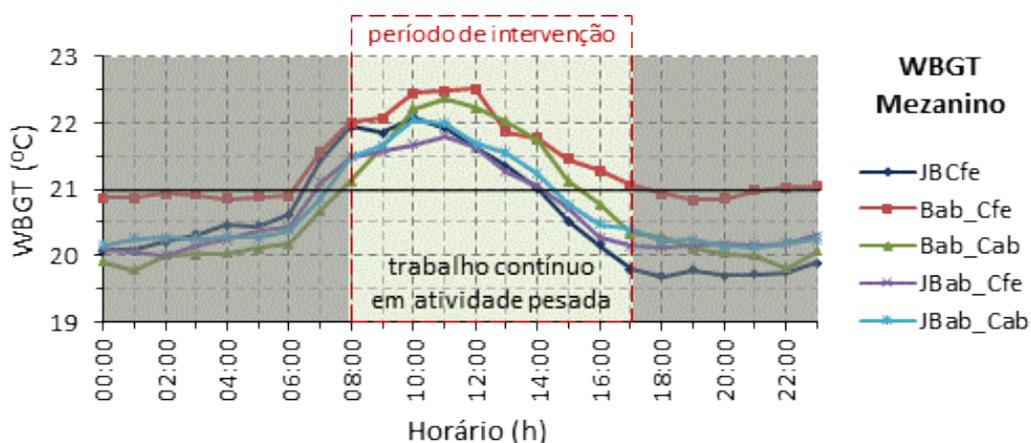


Figura 39- Curvas de WBGT do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos

No seu experimento com protótipo de habitações de interesse social em Campina Grande, durante o inverno, Viana (2011) registrou WBGT mínimo de

18,5 °C e WBGT máximo de 26,5 °C, quando da ausência de forro de cobertura indicando a impossibilidade de realização de atividade pesada e contínua no pavimento superior da edificação analisada.

A comparação entre os registros feitos por Viana (2011) e os resultados encontrados na pesquisa atual, concorre para uma avaliação de maior adequabilidade da nova tipologia proposta.

Os valores médios, máximos e mínimos de WBGT para cada tratamento durante o período de intervenção, são apresentados na Tabela 30, juntamente com a classificação do ambiente térmico tendo como parâmetro os valores fixados pela norma brasileira.

Tabela 30- Valores médios (máximo e mínimo) de WBGT e classificação do ambiente térmico, segundo NR 15 (BRASIL, 1978)

Dados (no período de intervenção)	Sala					Mezanino				
	Tratamentos									
	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab
WBGT máximo	22,0	22,5	22,0	21,8	22,2	22,1	22,5	22,4	21,7	22,1
WBGT mínimo	19,7	21,0	20,3	19,9	20,4	19,8	21,1	20,3	20,1	20,4
Período	Classificação térmica do ambiente, segundo NR 15									
	% do período / % do dia					% do período / % do dia				
	18:00 h às 7:00 h (58% do dia)	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58
8:00 h às 17:00 h (42% do dia)	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42

Adequado para tarefas com $284,3 \text{ W.m}^{-2} < M < 355,4 \text{ W.m}^{-2}$ em regime contínuo de trabalho ($< 25 \text{ }^\circ\text{C}$)

A ISO 7243 (ISO, 1989) estabelece valores referenciais de WBGT em torno de 22 °C a 23 °C, para que o ambiente seja considerado adequado ao desempenho de atividades com taxa metabólica entre 200 e 260 W.m⁻² (3,4 e 4,5 met), por pessoas não adaptadas ao calor. Valores referenciais de WBGT em torno de 18 °C a 20 °C, indicam ambientes adequados à realização de tarefas com metabolismo superior a 260 W.m⁻²; os dados fornecidos na Tabela 31 consideraram um valor intermediário de 21 °C para classificação dos ambientes vislumbrando o preenchimento da lacuna existente entre as faixas definidas por esta norma.

Tabela 31- Classificação térmica do ambiente em função dos valores definidos pela ISO 7243 (ISO, 1989)

Período	Classificação térmica do ambiente, segundo NR 15									
	% do período / % do dia					% do período / % do dia				
	Sala					Mezanino				
	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab
18:00 h às 7:00 h (58% do dia)	7 / 4	100 / 58	7 / 4	7 / 4	7 / 4	7 / 4	21 / 12		7 / 4	
	93 / 54		93 / 54	93 / 54	93 / 54	93 / 54	19 / 46	100 / 58	93 / 54	100 / 58
8:00 h às 17:00 h (42% do dia)	60 / 25	100 / 42	70 / 29	60 / 25	70 / 29	70 / 29	100 / 42	80 / 34	70 / 29	70 / 29
	40 / 17		30 / 13	40 / 17	30 / 13	30 / 13		20 / 8	30 / 13	30 / 13
	Adequado para tarefas com $200 \text{ W.m}^{-2} < M < 260 \text{ W.m}^{-2}$ ($< 21 \text{ }^\circ\text{C}$)									
	Adequado para tarefas com $M > 260 \text{ W.m}^{-2}$ ($> 21 \text{ }^\circ\text{C}$)									

A caracterização dos ambientes internos em questão, quando se adotam os critérios da norma internacional, mostra-se um pouco mais cautelosa; desta forma, no intervalo compreendido entre 8:00 h e 14:00 h, período mais quente do dia, recomenda-se a realização de tarefas com metabolismo máximo de 260 W.m^{-2} , com exceção do tratamento Bab_Cfe, no qual o intervalo é mais extenso e toma todo o período sob intervenção. Para todos os outros tratamentos nos horários entre 15:00 h e 17:00 h, a taxa metabólica pode ser aumentada.

Baseado no WBGT e considerando que o estudo foi realizado em edificação destinada ao uso residencial na qual, das 8 h às 17 h, devem predominar o trabalho doméstico e as atividades sedentárias cujas taxas metabólicas estimadas variam em torno de 116 W.m^{-2} (2 met), é possível presumir que os ambientes térmicos de sala e mezanino, independentes das condições de ventilação, tendem a ser caracterizados como confortáveis.

4.3.3 Voto Médio Estimado (PMV) e Percentual de Insatisfeitos (PPD)

O índice PMV é complementado pelo PPD enquanto o PMV caracteriza o ambiente a partir do voto de sensação térmica do usuário, o PPD identifica, entre os votantes, o percentual de insatisfeitos ou daqueles que podem sentir muito calor ou muito frio, em determinado ambiente.

A escala de PMV apresenta 7 graduações; para $\text{PMV}=0$, os votantes sentem total conforto com o ambiente não o desejando nem mais quente nem mais frio, caso em que um total de 5% de insatisfeitos com o ambiente está previsto; para $0 < \text{PMV} < 1$ ou $-1 < \text{PMV} < 0$, os usuários sentem o espaço como

ligeiramente quente ou ligeiramente frio, respectivamente; nessas faixas o PPD prevê até 10% de insatisfeitos embora a maioria dos votantes ainda sinta neutralidade térmica no ambiente; para $1 < PMV < 2$ ou $-2 < PMV < -1$, os ocupantes do espaço sentem desconforto incluindo o ambiente na categoria quente ou frio, respectivamente; neste intervalo o PPD apresenta até 25% de insatisfeitos com a minoria dos votantes sentindo conforto neste espaço.

Tendo em vista que o ambiente analisado se encontrava desocupado, foram previstas duas situações: na primeira, os usuários se encontravam sentados e relaxados ($M= 1$ met) trajando roupas compridas e flaneladas ($I_{cl}= 0,9$ met) enquanto na segunda desempenhavam atividades domésticas em pé ($M= 2$ met) vestindo roupas leves de trabalho ($I_{cl}= 0,5$ clo).

Situação 1:

Na sala e no período de intervenção, as curvas de PMV para os tratamentos JBCfe e Bab_Cfe ocuparam, durante 60% do tempo (25% do dia), a zona de neutralidade térmica, como se verifica nas Figuras 40 e 41, nas quais são apresentadas as curvas de PMV e PPD para sala, respectivamente. É importante lembrar que o período de aplicação do tratamento JBCfe correspondeu às mais altas temperaturas do ar exterior o que resultou em ambiente ligeiramente quente no intervalo entre 10:00 h e 13:00 h.

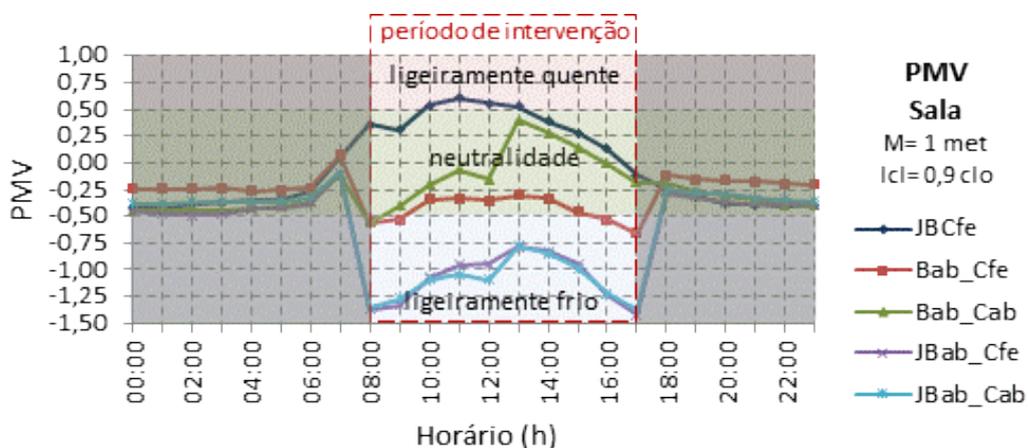


Figura 40- Curvas de PMV do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 1)

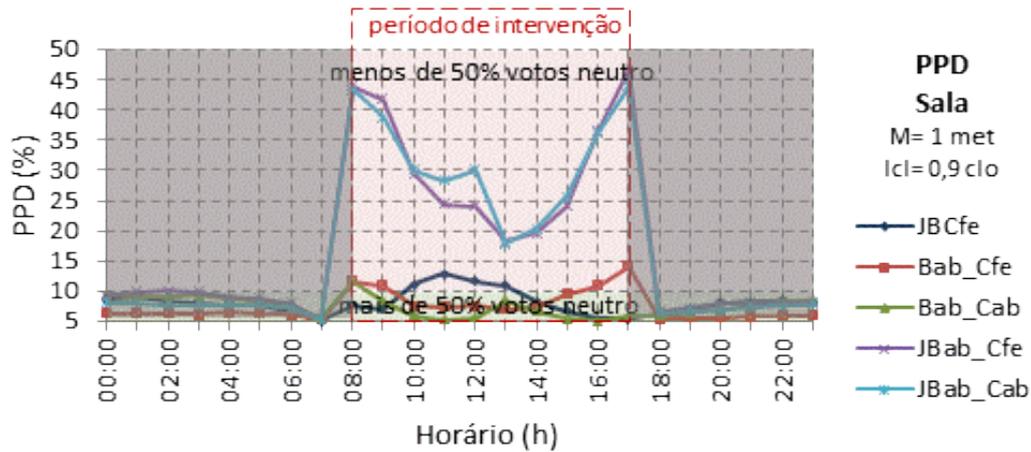


Figura 41- Curvas de PPD do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 1)

O tratamento Bab_Cab foi aquele em que o ambiente interno da sala permaneceu mais tempo (90% do período e 96% do dia) na zona de neutralidade térmica. Os ganhos de calor por radiação, advindos das aberturas totais das janelas, associados aos vãos livres dos combogós, colaboraram para o comportamento anômalo com valoração de PMV a partir das 12:00 h, o que alerta para a necessidade de balanceamento das cargas internas de calor (dos benefícios do resfriamento proporcionado pelos grandes vãos de ventilação e dos prejuízos do aquecimento provocado pela radiação solar que adentra a edificação por suas aberturas para o exterior, sem dispositivos de sombreamento).

Na Tabela 32 são apresentados dados de PMV/ PPD e a classificação de cada ambiente, para os cinco tratamentos.

Tabela 32- Valores médios (máximo e mínimo) de PMV e PPD para sala e mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 1)

Situação 1 (M= 1 met e lcl= 0,90 clo)										
Dados (no período de intervenção)	Sala					Mezanino				
	Tratamentos					Tratamentos				
	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab
PMV máximo	0,61	-0,30	0,40	-0,79	-0,78	0,96	0,55	0,74	0,71	0,48
PPD máximo	13	7	8	18	18	24	11	16	16	10
PMV mínimo	-0,12	-0,66	-0,56	-1,42	-1,37	-0,08	-0,04	-0,15	-0,15	-0,38
PPD mínimo	5	14	12	47	44	5	5	5	5	8
Período	Classificação térmica do ambiente									
	% do período / % do dia					% do período / % do dia				
	18:00 h às 7:00 h (58% do dia)	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58
Período de intervenção 8:00 h às 17:00 h (42% do dia)	40 / 17					50 / 21		30 / 13	30 / 13	
	60 / 25	60 / 25	90 / 38			50 / 21	100 / 42	70 / 29	70 / 29	100 / 42
		40 / 17	10 / 4	100 / 42	100 / 42					

leiramente quente neutro leiramente frio

Ao longo de todos os outros tratamentos os valores de PMV foram menores que -0,50, indicando ambiente levemente desconfortável por frio nos quais os valores mais elevados de PPD aconteceram pela combinação de maior taxa de ventilação devido ao maior percentual de abertura das janelas, com menor radiação solar.

No mezanino, como pode ser observado na Figura 42, a curva de PMV para o tratamento JBCfe apresenta, durante o período de intervenção, comportamento semelhante àquele da sala; entretanto, com maior duração na zona ligeiramente quente, em torno de 50% do período (21% do dia).

Para os outros tratamentos os valores de PMV ocupam, na maior parte do intervalo das 8:00 h às 17:00 h a zona de neutralidade com destaque para a curva gerada para o tratamento JBab_Cab, justificada pela maior taxa de ventilação do mezanino, proveniente da aberturas localizadas na sala.

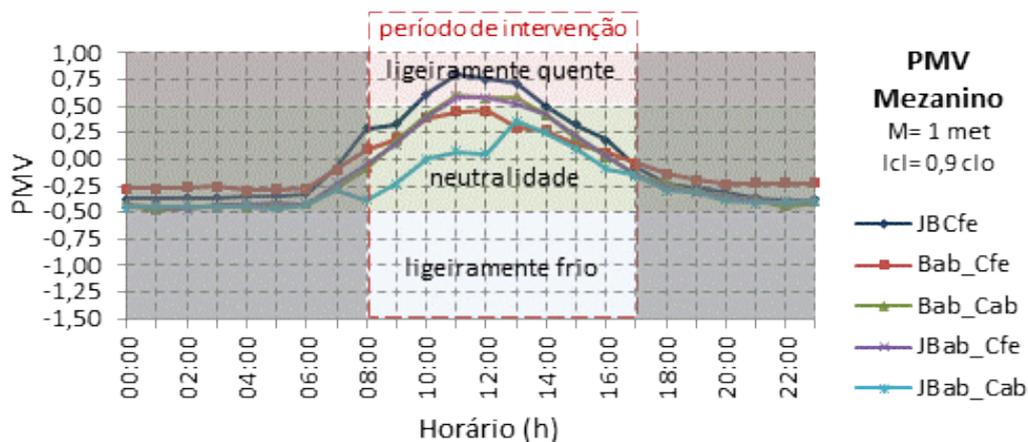


Figura 42- Curvas de PMV do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 1)

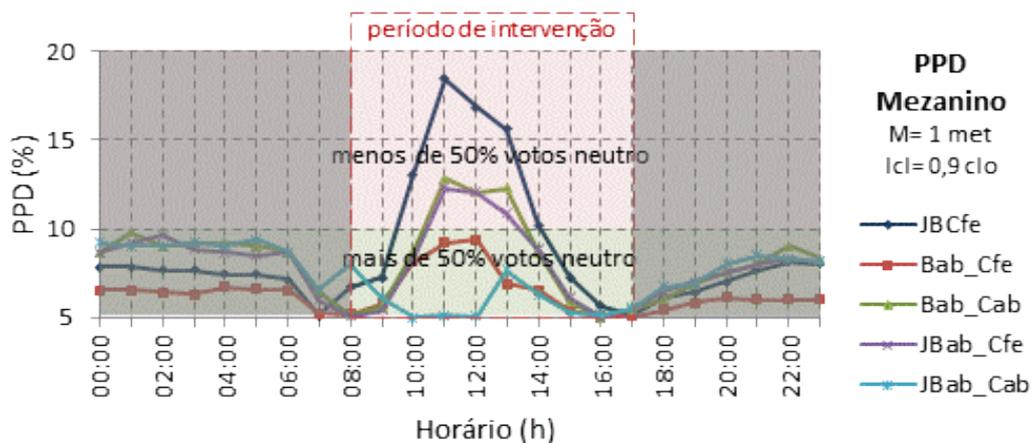


Figura 43- Curvas de PPD do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 1)

É imprescindível atentar para os altos valores relativos de PMV e PPD máximo (Tabela 29 e Figura 43) em todos os tratamentos, indicando que o mezanino tende a ser ligeiramente mais quente que a sala, independente do padrão de manipulação das janelas, corroborando com a ideia de que o posicionamento e a altura interna do espaço, frente à orientação da edificação e à proximidade da cobertura, refletem em temperaturas internas mais ou menos adequadas ao conforto.

De maneira geral, a caracterização dos ambientes estudados em função de PMV e PPD no período de inverno, entre 8:00 h e 17:00 h, permite afirmar que pessoas sentadas e relaxadas ($M= 1\text{met}$) quando expostas à maior ventilação (janelas e bandeiras abertas), percebem o ambiente térmico da sala como ligeiramente frio e do mezanino como neutro, podendo sentir leve desconforto por calor nos horários entre 10:00 h e 14:00 h; as rotinas que se mostraram mais adequadas ao conforto simultâneo de sala e mezanino foram Bab_Cfe e Bab e Cab.

Situação 2:

As curvas de PMV e PPD, para sala, na segunda situação, são apresentadas nas Figuras 44 e 45, respectivamente.

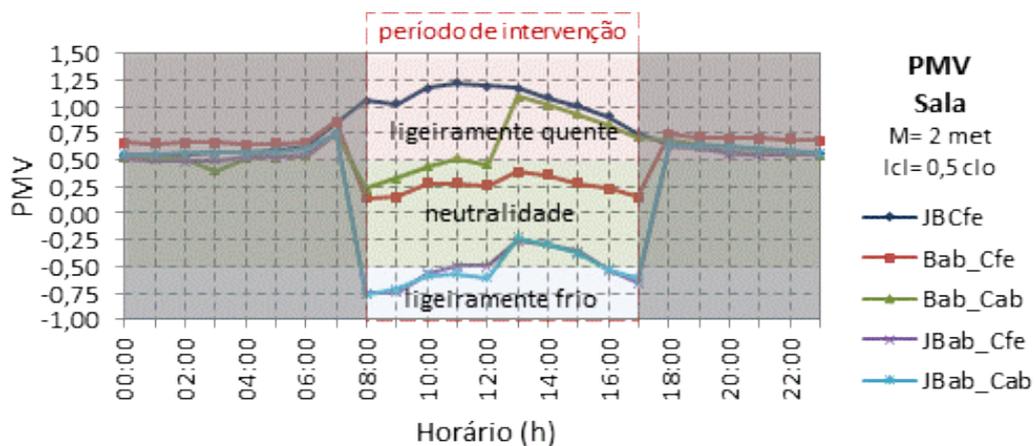


Figura 44- Curvas de PMV do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 2)

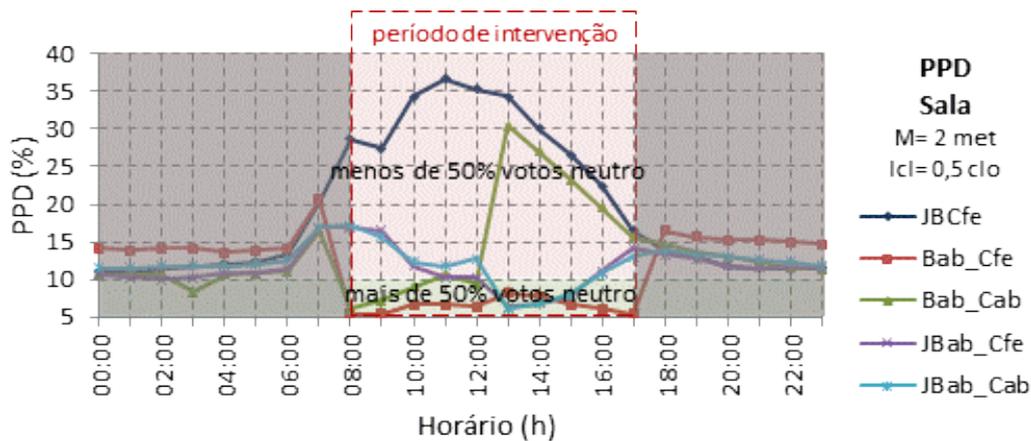


Figura 45- Curvas de PPD do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 2)

Ao longo do tratamento JBCfe o ambiente da sala é classificado como ligeiramente quente para realização de tarefas domésticas (M= 2met); a análise, segundo PMV, deixa notório que maiores taxas de ventilação não são adequadas para manutenção da sensação de neutralidade térmica, durante meses mais frios uma vez que as curvas geradas para JBab_Cfe e JBab_Cab, em 50% e 70% do período de intervenção (21% e 29% do dia) ocupam, respectivamente, a zona de leve estresse por frio (Tabela 33).

Tabela 33- Valores médios (máximo e mínimo) de PMV e PPD para sala e mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 2)

Situação 2 (M= 2 met e Icl= 0,50 clo)										
Dados (no período de intervenção)	Sala					Mezanino				
	Tratamentos					Tratamentos				
	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab
PMV máximo	1,23	0,39	1,10	-0,26	-0,23	1,36	1,12	1,23	1,21	1,07
PPD máximo	37	8	31	6	6	43	31	37	36	29
PMV mínimo	0,74	0,14	0,23	-0,75	-0,76	0,77	0,79	0,73	0,72	0,48
PPD mínimo	17	5	6	17	17	17	18	16	16	10
Período	Classificação térmica do ambiente									
	% do período / % do dia					% do período / % do dia				
	18:00 h às 7:00 h (58% do dia)	100 / 58	100 / 58	93 / 54	79 / 46	100 / 58	100 / 58	100 / 58	93 / 54	93 / 54
Período de intervenção 8:00 h às 17:00 h (42% do dia)	100 / 42		60 / 25			100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42	90 / 38
		100 / 42	40 / 17	50 / 21	30 / 13					10 / 4
				50 / 21	70 / 29					

ligeiramente quente neutro ligeiramente frio

Os valores de PMV para o tratamento com ventilação advindas apenas das bandeiras (Bab_Cfe) se mantiveram dentro dos limites de conforto recomendado ao longo de todo o intervalo sob intervenção.

A curva de PPD para JBCfe indica este tratamento como o menos adequado de vez que em 100% do dia, a sala é caracterizada como levemente quente apresentando PPD médio de 25%; é nítida a alteração comportamental da curva de Bab_Cab no período vespertino, provavelmente em resposta à conjugação entre aumento da radiação solar - que adentra o espaço pelos combogós elevando, em contrapartida, a temperatura do ar e a radiante média - e menor velocidade do vento no período da tarde quando comparada ao da manhã.

No mezanino, como sinalizado nas Figuras 46 e 47, o ambiente térmico não é adequado à execução de tarefas domésticas em pé, em nenhum período do dia, independente do padrão adotado para manuseio das aberturas de ventilação; dos tratamentos adotados J Bab_Cab apresenta o melhor resultado no intervalo entre 8:00 h e 12:00 h.

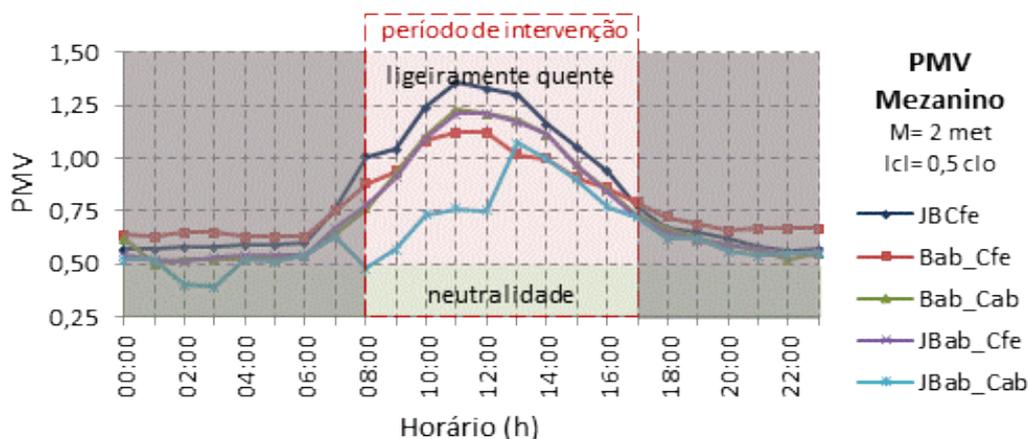


Figura 46- Curvas de PMV do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 2)

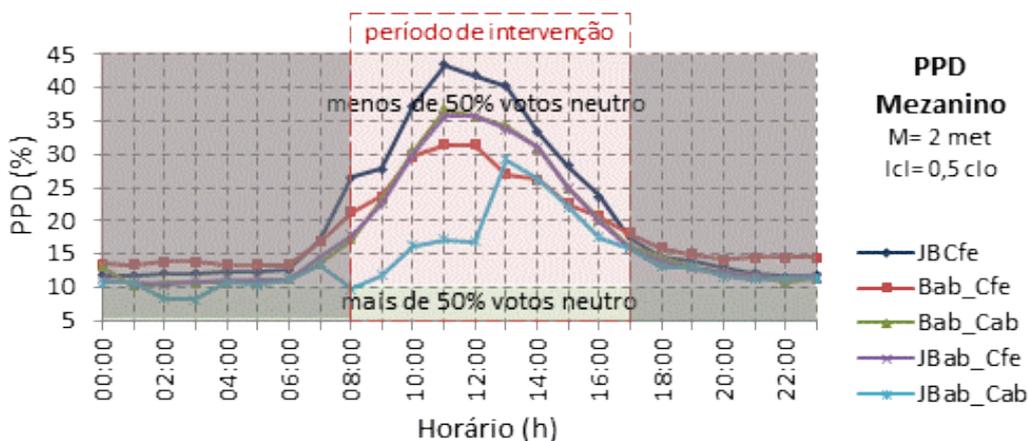


Figura 47- Curvas de PPD do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 2)

Assim, a análise dos ambientes estudados em função de PMV e PPD permite inferir que para a manutenção do conforto térmico durante a execução de tarefas domésticas em pé, no período de inverno, faz-se necessário o estabelecimento de rotinas diferenciadas para sala e mezanino; é conveniente, também, manter apenas as bandeiras abertas quando do uso da sala enquanto na utilização do mezanino é imprescindível, ainda que não eficaz, permanecer com todas as aberturas de ventilação descerradas.

4.3.4 Temperatura Fisiológica Equivalente (PET)

Monteiro (2008) propôs uma faixa interpretativa para PET considerando pessoas adaptadas às condições climáticas em que se encontram, a partir dos resultados de seu experimento em campo aberto realizado na cidade de São Paulo. Com esses limites estabelecidos é possível classificar o ambiente térmico como: neutro, para $18\text{ °C} \leq \text{PET} \leq 26\text{ °C}$; pouco quente, para $26\text{ °C} < \text{PET} \leq 31\text{ °C}$ e pouco frio para $12\text{ °C} \leq \text{PET} < 18\text{ °C}$.

Para o cálculo de PET foram simuladas situações similares àquelas utilizadas para o cálculo de PMV e PPD. Para cada situação foram determinados dois valores de PET considerando-se o biotipo de homem e mulher padrão porém, os resultados encontrados quando considerados os aspectos físicos, foram idênticos, em função de que são apresentadas apenas as curvas geradas para a situação 1, em que $M= 1\text{ met}$ e $I_{cl}= 0,9\text{ clo}$ e para a situação 2, em que $M= 2\text{ met}$ e $I_{cl}= 0,5\text{ clo}$.

Situação 1:

É possível observar comportamentos distintos de PET para os dois ambientes, como indicado nas Figuras 48 e 49; na sala, enquanto não há manipulação das aberturas de ventilação (tratamento JBCfe) os valores de PET tendem a aumentar com a elevação da temperatura externa em função da radiação solar global; desta forma, durante 40% do período de intervenção, ocupa a zona classificada como levemente quente; nos demais tratamentos as curvas de PET mantêm certa similaridade demonstrando a importância da

variável velocidade do ar, para o índice e para a manutenção das condições de neutralidade térmica.

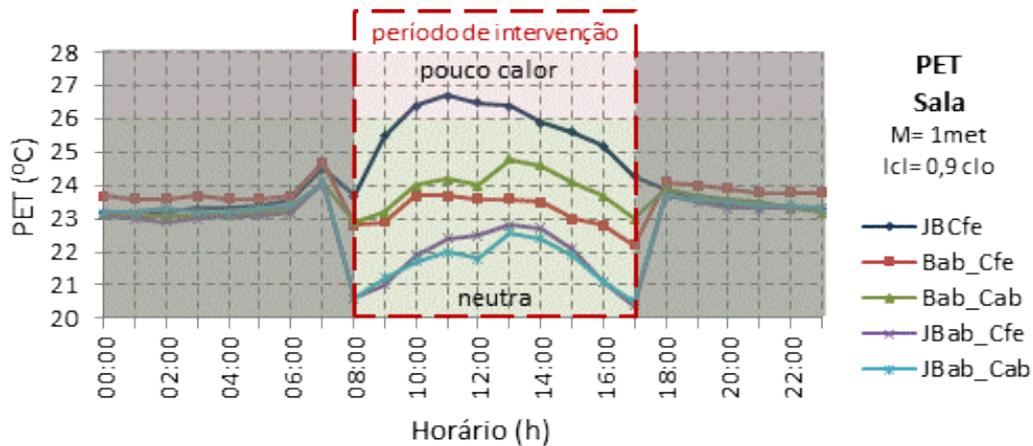


Figura 48- Curvas de PET do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 1)

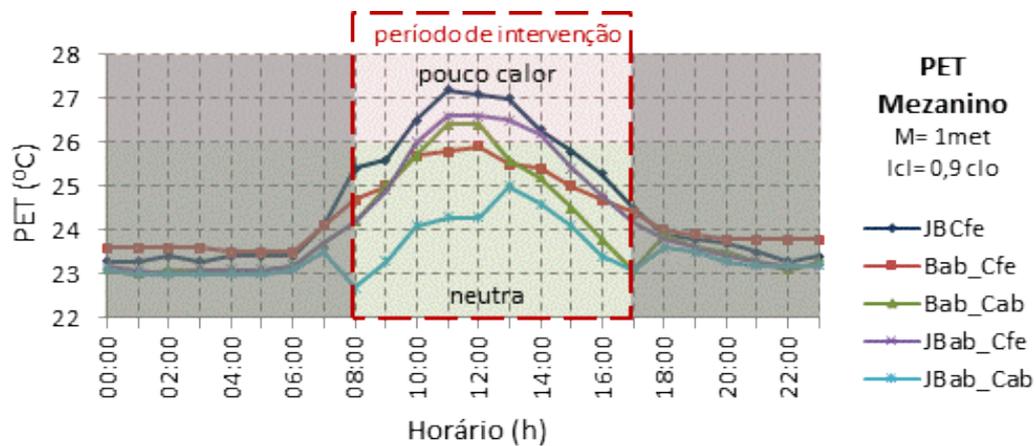


Figura 49- Curvas de PET do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 1)

No mezanino a curva gerada para o tratamento JBab_Cab, no qual a taxa de ventilação é mais elevada, se destaca das demais, indicando que quanto maior for a entrada de ar pelas aberturas da sala menor será a possibilidade de ocorrência de sensação de calor nas horas mais quentes do dia.

Os dados de PET máximo e mínimo para o período de intervenção, juntamente com a classificação de cada ambiente, durante os cinco tratamentos estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 34- Valores médios (máximo e mínimo) de PET para sala e mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 1)

Situação 1 (M= 1 met e Icl= 0,90 clo)										
Dados (no período de intervenção)	Sala					Mezanino				
	Tratamentos					Tratamentos				
	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab
PET máximo	26,7	23,7	24,8	22,8	22,6	27,2	25,9	26,4	26,6	25,0
PET mínimo	23,7	22,2	22,9	20,4	20,5	24,5	24,4	23,1	24,2	22,7
Classificação térmica do ambiente										
Período	% do período / % do dia					% do período / % do dia				
18:00 h às 7:00 h (58% do dia)	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58
Período de intervenção 8:00 h às 17:00 h (42% do dia)	40 / 17					50 / 21		20 / 8	40 / 17	
	60 / 25	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42	50 / 21	100 / 42	80 / 34	60 / 25	100 / 42

ligeiramente quente
 neutro
 ligeiramente frio

Situação 2:

Os valores calculados nesta situação para PET, produzem curvas análogas à situação anterior, que confirmam a delimitação do intervalo de maior criticidade entre 9:00 h e 15:00 h, como se pode verificar nas Figuras 50 e 51.

Os valores médios, máximo e mínimo durante o período de intervenção para cada um dos cinco tratamentos, juntamente com a classificação de cada ambiente, são mostrados na Tabela 35.

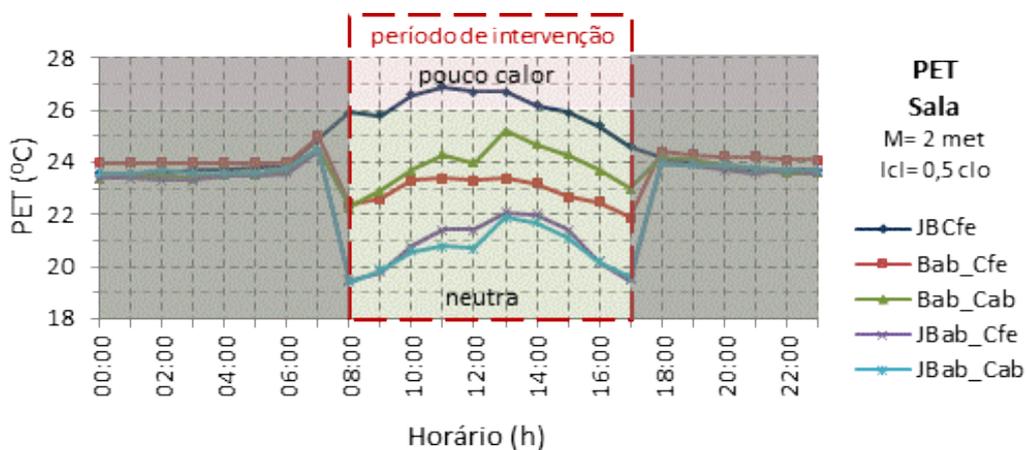


Figura 50- Curvas de PET do ambiente da sala, para os cinco tratamentos (Situação 2)

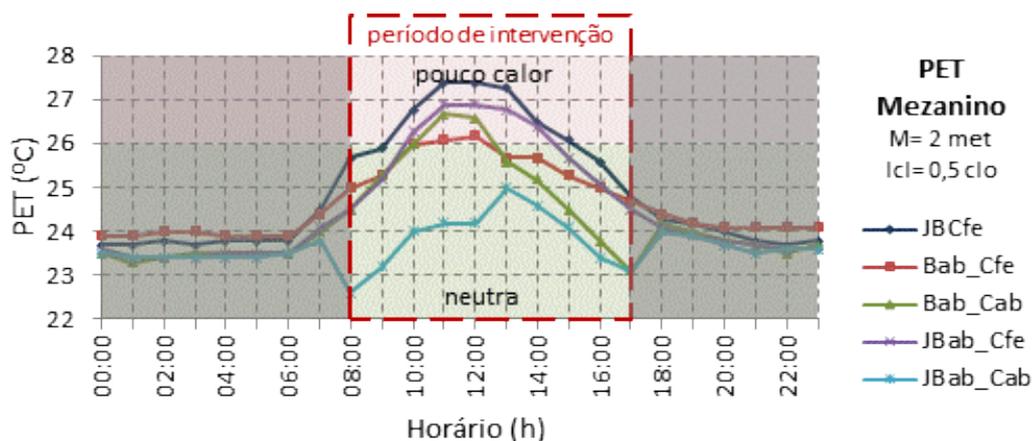


Figura 51- Curvas de PET do ambiente do mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 2)

Tabela 35- Valores médios (máximo e mínimo) de PET para sala e mezanino, para os cinco tratamentos (Situação 2)

Situação 2 (M= 2 met e Icl= 0,50 clo)										
Dados (no período de intervenção)	Sala					Mezanino				
	Tratamentos					Tratamentos				
	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab	JBCfe	Bab_Cfe	Bab_Cab	JBab_Cfe	JBab_Cab
PET máximo	26,9	23,4	25,2	22,1	21,9	27,4	26,2	26,7	26,9	25,0
PET mínimo	24,6	21,9	22,3	19,5	19,4	24,8	24,7	23,1	24,5	22,6
Classificação térmica do ambiente										
Período	% do período / % do dia					% do período / % do dia				
18:00 h às 7:00 h (58% do dia)	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58	100 / 58
Período de intervenção 8:00 h às 17:00 h (42% do dia)	50 / 21					60 / 25	20 / 8	20 / 8	50 / 21	
	50 / 21	100 / 42	100 / 42	100 / 42	100 / 42	40 / 17	80 / 34	80 / 34	50 / 21	100 / 42

ligeiramente quente neutro ligeiramente frio

Segundo PET, pode-se classificar a sala como um ambiente propício tanto ao relaxamento sentado quanto ao desenvolvimento de atividades domésticas em pé, desde que as entradas de ar (janelas e/ou bandeiras) sejam conservadas abertas.

No mezanino a condição de conforto térmico em tempo integral, somente é mantida desde que todas as aberturas de captação e exaustão de ar estejam descerradas; nas demais situações nos horários entre 9:00 h e 15:00 h o mezanino é classificado como ligeiramente quente.

Nas situações 1 e 2 é notória a semelhança entre o comportamento das curvas geradas para os índices PMV/PPD e PET, para cada ambiente e tratamento; mesmo assim, os limites estabelecidos para a zona de neutralidade térmica em função de PET, são bem mais amplos.

4.4 Análise do desempenho térmico

A análise de desempenho térmico de edificações habitacionais de até cinco pavimentos pelo método simplificado ou por medição, é prevista na NBR 15575:1 (ABNT, 2013).

4.4.1 Método simplificado

Na análise pelo método simplificado a edificação deve reunir características que atendam às exigências de desempenho térmico considerando a região de implantação da obra e as respectivas especificidades bioclimáticas definidas na NBR 15220:3 (ABNT, 2005); a sequência utilizada abaixo está prevista na NBR 15575:1 (ABNT, 2013).

4.4.1.1 Propriedades térmicas dos elementos de vedação

Os valores calculados para as propriedades térmicas das paredes e aqueles adotados para a cobertura estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36- Valores calculados e adotados para as propriedades térmicas das paredes e cobertura da edificação

	Propriedade térmica	Símbolo	Valor calculado
PAREDES (CALCULADO)	Resistência térmica total	R_T	0,4124 m ² .K.W ⁻¹
	Resistência térmica- seção A	R_a	0,1217 m ² .K.W ⁻¹
	Resistência térmica- seção B	R_b	0,1434 m ² .K.W ⁻¹
	Resistência térmica- seção C	R_c	0,3967 m ² .K.W ⁻¹
	Resistência térmica	R_t	0,2424 m ² .K.W ⁻¹
	Transmitância térmica	U	2,4248 W.m ⁻² .K ⁻¹
	Capacidade térmica total	C_T	172,96 kJ.m ⁻² .K ⁻¹
	Capacidade térmica- seção A	C_{Ta}	280,00 kJ.m ⁻² .K ⁻¹
	Capacidade térmica- seção B	C_{Tb}	232,48 kJ.m ⁻² .K ⁻¹
	Capacidade térmica- seção C	C_{Tc}	144,16 kJ.m ⁻² .K ⁻¹
	Atraso térmico	ϕ	3,58 horas
	Fator solar	FS_o	1,94%
	COBERTURA (ADOTADO)	Transmitância térmica	U
Capacidade térmica total		C_T	18,00 kJ.m ⁻² .K ⁻¹
Atraso térmico		ϕ	0,30 horas

4.4.1.2 Verificação do atendimento às exigências normativas

Uma vez calculados os valores das propriedades térmicas dos materiais empregados no envelope construtivo, procedeu-se à verificação do atendimento às exigências normatizadas.

Paredes:

É possível verificar, conforme apresentado na Tabela 37, que os fechamentos verticais atendem a todas as exigências constantes nas normas brasileiras de desempenho térmico.

Tabela 37- Valores recomendados pelas normas de referência para habitações na ZB08 e aqueles calculados para cada propriedade térmica de parede

Propriedade térmica	Recomendado		Calculado	Verificação
	NBR 15220:3	NBR 15575:4		
Transmitância (U) ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	$\leq 3,60$	Para $\alpha \leq 0,60$ $\leq 3,70$	= 2,42	Atende
Atraso (φ) (Horas)	$\leq 4,30$	Sem exigência	= 3,58	Atende
Fator solar (FS_o) (%)	$\leq 4,00$	Sem exigência	= 1,94	Atende

A absorvidade (α) da parede externa, pintada na cor branca, foi considerada igual a 0,20

Cobertura:

A análise da Tabela 38, na qual são apresentados os valores recomendados e adotados pelas normas de referência para cada propriedade térmica, permite concluir que, inicialmente, a cobertura não atende aos critérios mínimos de desempenho térmico.

Tabela 38- Valores recomendados e adotados pelas normas de referência para habitações na ZB08, para cada propriedade térmica de cobertura

Propriedade térmica	Recomendado		Adotado	Verificação
	NBR 15220:3	NBR 15575:4		
Transmitância (U) ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	$\leq 2,30.FT$	Se $\alpha > 0,40$ $\leq 1,50.FT$	= 4,55	Não atende
Atraso (φ) (Horas)	$\leq 3,30$	Sem exigência	= 0,30	Não atende
Fator solar (FS_o) (%)	$\leq 6,50$	Sem exigência	= 13,65	Não atende

A absorvidade da cobertura em telha cerâmica, $\alpha = 0,75$

Para $h = 5$ cm, $FT = 0,97$

A NBR 15220:3 (ABNT, 2005), no entanto considera aceitável, na ZB08, coberturas com telhas cerâmicas sem forro desde que possuam as seguintes características:

- Telhas sem pintura ou esmaltagem;
- Coberturas com aberturas para ventilação em no mínimo dois beirais opostos;
- Aberturas para ventilação ao longo de toda a extensão das fachadas respectivas.

Sabendo que a vedação horizontal da unidade habitacional experimental possui todos esses requisitos admite-se, finalmente, que a cobertura é termicamente aceitável atendendo aos critérios mínimos de desempenho das normas brasileiras.

4.4.1.3 Aberturas de ventilação

Na sequência, o método simplificado de avaliação de desempenho térmico estabelece a necessidade de determinação das áreas de abertura de ventilação e posterior verificação do atendimento dos critérios normatizados.

Tabela 39- Valores recomendados para habitações na ZB08 e calculados das áreas de abertura para ventilação de sala e mezanino

Norma	Recomendado	Calculado	
		Sala	Mezanino
NBR 15220:3	Grandes $A > 0,40.A_p$	$A_p = 16,85 \text{ m}^2$ $A = 5,04 \text{ m}^2$	$A_p = 8,28 \text{ m}^2$ $A = 5,04 \text{ m}^2$
Verificação		Não atende	Atende
NBR 15575:4	Grandes $A_a \geq 0,08.A_p$	$A_p = 16,85 \text{ m}^2$ $A_a = 3,57 \text{ m}^2$	$A_p = 8,28 \text{ m}^2$ $A_a = 3,57 \text{ m}^2$
Verificação		Atende	Atende

A é a área da esquadria de captação e exaustão, excluindo portas;

A_a é a área efetiva de ventilação. Consideraram-se área efetiva de ventilação: 100% da área de abertura das janelas e 50% da área de abertura das bandeiras e combogós, incluindo a bandeira da porta;

O valor recomendado pela NBR 15575:4 corresponde àquele adotado pelo Código de Obras Municipal de Campina Grande.

É possível afirmar, pela análise da Tabela 39, que as áreas de abertura para ventilação atendem parcialmente às exigências mencionadas na NBR

15220:3 (ABNT, 2005) e, integralmente, às constantes na NBR 15575:4 (ABNT, 2013).

Em seu estudo, Francisco (2009), verificou o enquadramento dos vãos de abertura de habitações de interesse social implantadas em assentamentos rurais na NBR 15220:3 e encontrou resultado semelhante. Nos casos estudados as aberturas de ventilação correspondiam a apenas 11,65% da área do piso. Como medida para potencialização da estratégia de condicionamento passivo por ventilação cruzada o autor sugeriu recorrer à abertura das portas.

Lima (2007) questiona a adequação desta exigência visto que dimensões generosas significam, quase sempre, incremento significativo nos custos de construção podendo conduzir a trocas indesejadas de calor interno; ele alerta, ainda, que a porcentagem de abertura sugerida pela norma brasileira pode ser adequada para ambientes de permanência prolongada, mas excessiva para os demais, passível de proporcionar desconforto térmico e visual.

Para esquadrias não sombreadas e com vidro, o aumento da área envidraçada pode significar aumento das temperaturas máximas e médias internas ao tempo em que conduz a uma redução das temperaturas mínimas. O incremento das máximas e o decréscimo das mínimas podem atingir 2 °C (YOSHIDA, 2006).

4.4.2 Método por medição

Segundo o constante do Anexo A da NBR 15575:1 (ABNT, 2013), sobre procedimentos da avaliação do desempenho térmico de edificações por meio de simulação e por medição para medições realizadas em períodos de inverno, “os valores mínimos diários da temperatura do ar interior de recintos de permanência prolongada como, por exemplo, salas e dormitórios, no dia típico de inverno, devem ser sempre maiores ou iguais à temperatura mínima externa acrescida de 3 °C”.

O dia escolhido para avaliação deve apresentar valor mínimo de temperatura externa de bulbo seco igual ao do dia típico de inverno (no caso de

Campina Grande, $t_{bs} = 19,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$)) e ter sido precedido pelo menos de um dia, com características semelhantes.

Ao longo da coleta de dados o dia em que a temperatura mínima do ar externa mais se aproximou do dia típico de inverno, registrou t_{bs} exterior igual a $19,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (dia 29/05), tendo sido precedido por dia semelhante; na Tabela 40 se encontram os dados de t_{bs} mínima para o exterior e para o interior da sala e do mezanino, com seus respectivos gradientes.

Tabela 40- Diferenças de temperatura mínima do ar entre os ambientes estudados e o exterior

Registro	t_{bs} mínima ($^{\circ}\text{C}$)				
	Exterior	Sala	Diferença (sala-exterior)	Mezanino	Diferença (mezanino-exterior)
dia 28/05	19,8	21,1	1,3	21,3	1,5
dia 29/05	19,8	20,9	1,1	21,2	1,4
Verificação			Não atende		Não atende

É possível verificar que, quando utilizado o método de análise por medição, o desempenho térmico da sala e do mezanino da unidade experimental não atende à exigência constante no Anexo A da NBR 15575:1 (ABNT, 2013), visto que os gradientes de temperatura encontrados foram inferiores a $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

No Anexo E da NBR 15575:1 (ABNT, 2013), sobre níveis de desempenho consta, no entanto, uma ressalva que isenta as edificações locadas nas ZB06, ZB07 e ZB08 da necessidade de atendimento aos critérios estabelecidos no Anexo A.

4.4.3 Comportamento térmico das vedações

4.4.3.1 Temperaturas superficiais das paredes

O comportamento das temperaturas superficiais das paredes externas (t_s ext.) sofreu mais alterações em razão da incidência direta dos raios solares, da radiação refletida pelo entorno (neste caso, pelo terreno), e da temperatura do ar exterior; em virtude disto, são de grande relevância as características de absorvidade e o grau de sombreamento de sua face externa; já as

temperaturas superficiais internas (t_s int.) foram substancialmente influenciadas pela inércia e resistividade térmica dos materiais que, combinados, compõem o sistema de vedação vertical enquanto as diferentes taxas de ventilação, referentes aos tratamentos adotados, não provocaram efeitos significantes na t_s int., a despeito do posicionamento (relativo às aberturas), dos pontos de medição.

Sala:

Para a análise das temperaturas superficiais das paredes da sala foram escolhidas as das fachadas voltadas a Leste (frontal) e a Norte (lateral); as curvas geradas para t_s ext., t_s int., juntamente com t_{bs} exterior, são apresentadas nas Figuras 52 a 61.

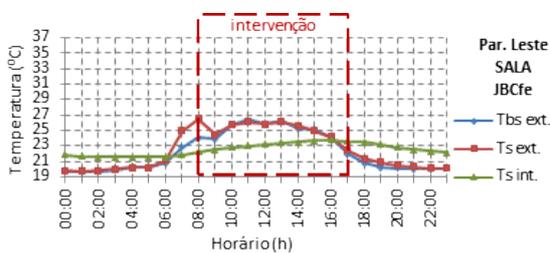


Figura 52- t_s ext e t_s int da parede Leste (sala), para JBCfe

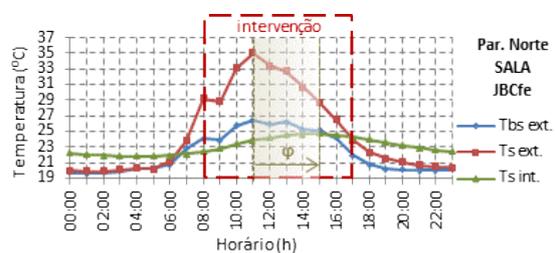


Figura 53- t_s ext e t_s int da parede Norte (sala), para JBCfe

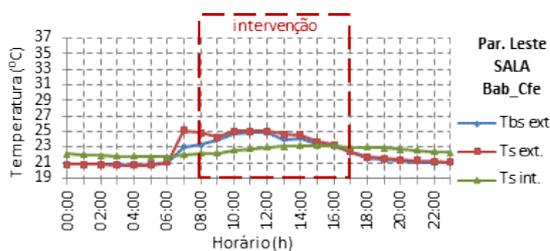


Figura 54- t_s ext e t_s int da parede Leste (sala), para Bab_Cfe

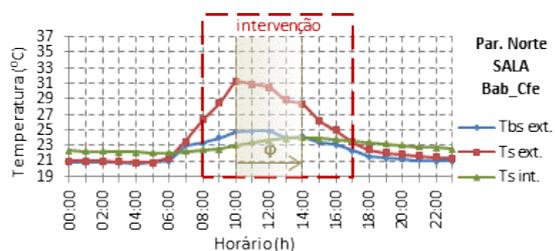


Figura 55- t_s ext e t_s int da parede Norte (sala), para Bab_Cfe

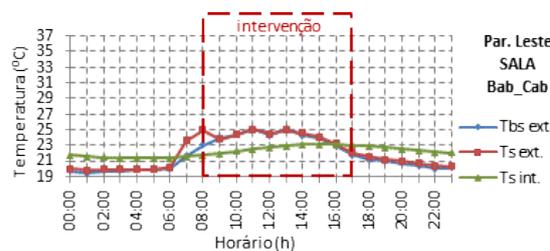


Figura 56- t_s ext e t_s int da parede Leste (sala), para Bab_Cab

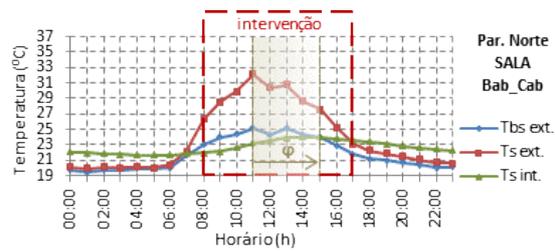


Figura 57- t_s ext e t_s int da parede Norte (sala), para Bab_Cab

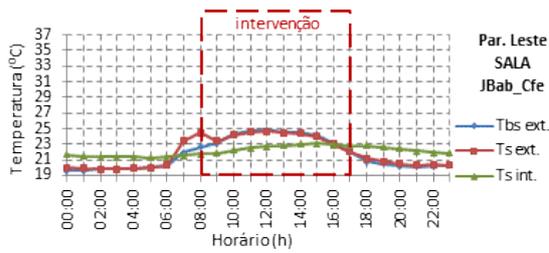


Figura 58- t_s ext e t_s int da parede Leste (sala), para JBab_Cfe

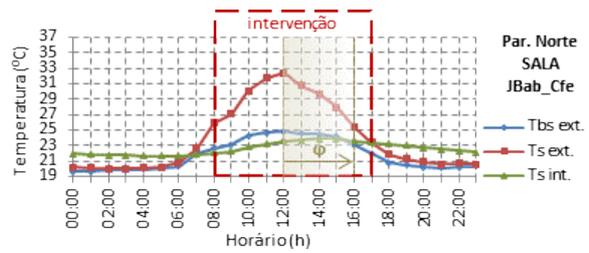


Figura 59- t_s ext e t_s int da parede Norte (sala), para JBab_Cfe

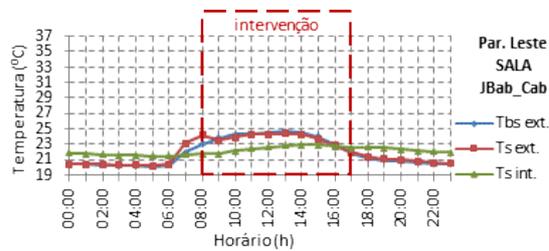


Figura 60- t_s ext e t_s int da parede Leste (sala), para JBab_Cab

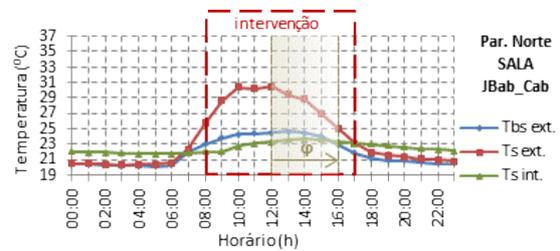


Figura 61- t_s ext e t_s int da parede Norte (sala), para JBab_Cab

Comparando os resultados apresentados para as duas paredes em cada tratamento isoladamente, pode-se observar que na parede orientada a Leste, durante o período em que há uma combinação entre intensificação da radiação solar e pequena parcela de área sombreada (entre 6:00 h e 8:00 h), os valores das médias das temperaturas da face externa tendem a aumentar gradativamente, afastando-se da curva de t_{bs} exterior em até 2,5 °C, voltando a decrescer quando aumenta a porcentagem de sombreamento (Figura 62); a partir de então, a cada hora, as médias da temperatura superficial externa acompanham bem de perto as da t_{bs} externa.

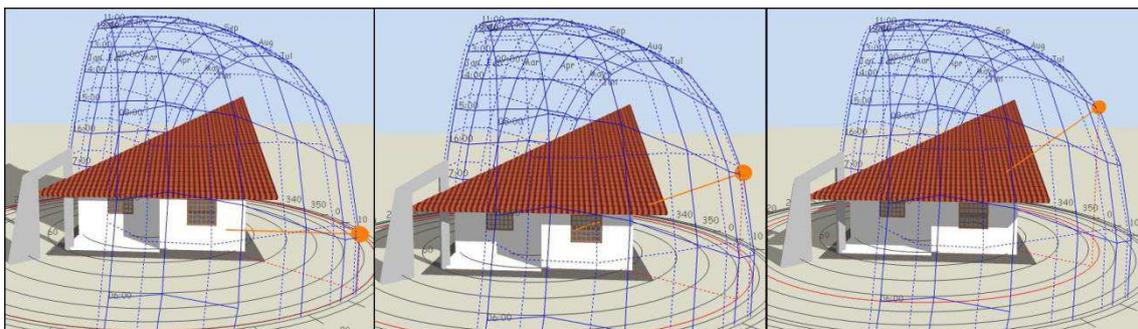


Figura 62-Simulação da posição solar e sombreamento da face Leste às 7:00 h, 8:00 h e 9:00 h
Fonte: Gerada pelo DesignBuilder, versão 3.2.0.073 (educacional)

Na parede lateral, voltada para o Norte, as médias da temperatura superficial externa apresentam valores crescentes a partir das 6:00 h, com registros que ultrapassam a t_{bs} exterior. Os valores máximos da t_s ext. da parede Norte ocorrem no período entre 10:00 h e 12:00 h chegando a atingir o pico de 35 °C; a diferença entre as médias das temperaturas máximas da face lateral e da t_{bs} exterior, chega a 8,7 °C.

Ainda que essas diferenças tenham apresentado, para a face externa frontal e lateral, valores bastante díspares, pode-se verificar que isto não se reflete nas médias das temperaturas máximas da face interna que, na parede frontal, chega a 23,7 °C enquanto na lateral a 24,7 °C, evidenciando a relevância da baixa transmitância térmica sobre menores ganhos internos de calor advindos dos elementos de fechamento vertical. Essas médias máximas ocorreram sempre durante o tratamento JBCfe pois as médias da temperatura do ar externa foram as mais elevadas do período experimental; a amplitude térmica máxima referente à t_s int. foi de 2,2 °C, para a parede orientada a Leste e de 2,8 °C, para a parede voltada a Norte.

O atraso térmico pode ser claramente verificado nos gráficos referentes à t_s ext. da parede Norte da sala - única nas mesmas condições de sombreamento ao longo do dia (Figura 63) - uma vez que é notável o retardado de 4 horas entre os eventos das médias máximas das temperaturas superficiais, externa e interna; a diferença de precisão entre o atraso térmico calculado ($\phi = 3,58$ horas ou $\phi = 3$ h e 35 min) e o observado nos gráficos, é devida à frequência adotada para a coleta dos dados de temperatura superficial.

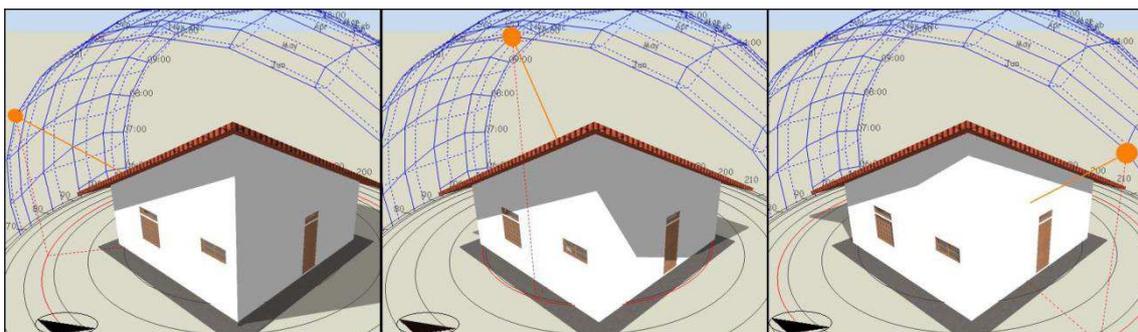


Figura 63- Simulação da posição solar e sombreamento das faces Norte e Oeste às 9:00 h, 12:00 h e 15:00 h

Fonte: Gerada pelo DesignBuilder, versão 3.2.0.073 (educacional)

Mezanino:

Para a análise das temperaturas superficiais das paredes do mezanino foram escolhidas as das fachadas voltadas para o Norte (lateral) e a Oeste (posterior); as curvas geradas para t_s ext., t_s int., juntamente com t_{bs} exterior, são apresentadas nas Figuras 64 a 73.

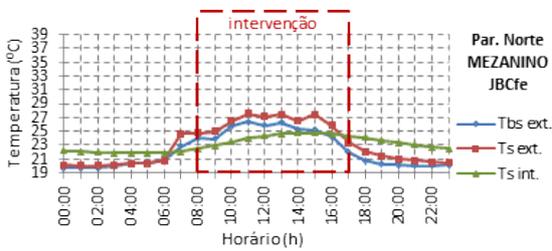


Figura 64- t_s ext e t_s int da parede Norte (mezanino), para JBCfe

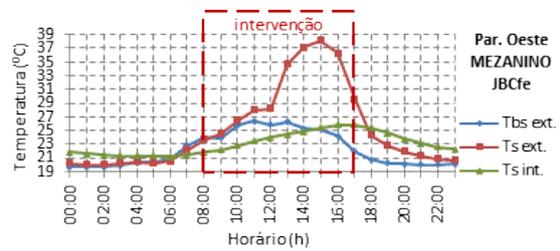


Figura 65- t_s ext e t_s int da parede Oeste (mezanino), para JBCfe

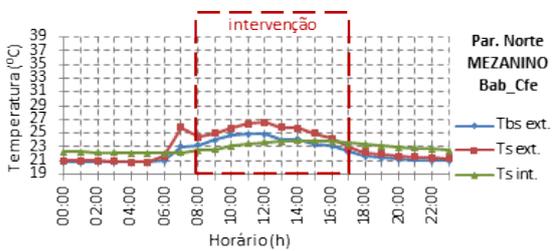


Figura 66- t_s ext e t_s int da parede Norte (mezanino), para Bab_Cfe

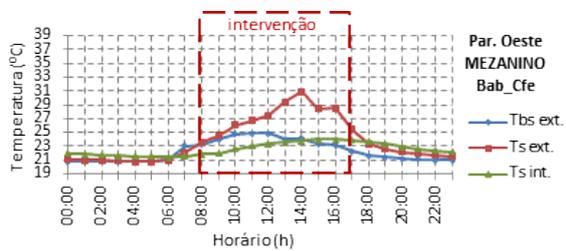


Figura 67- t_s ext e t_s int da parede Oeste (mezanino), para Bab_Cfe

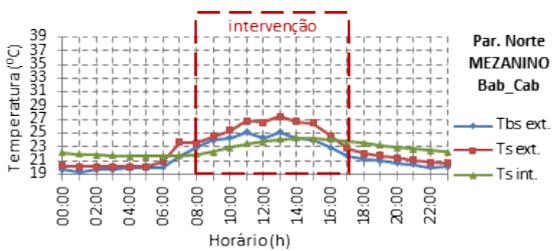


Figura 68- t_s ext e t_s int da parede Norte (mezanino), para Bab_Cab

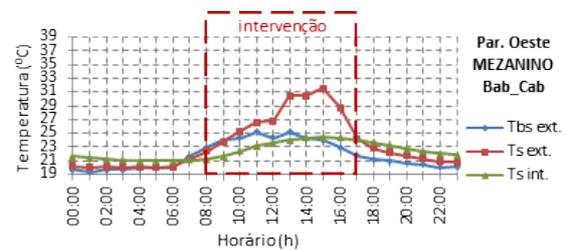


Figura 69- t_s ext e t_s int da parede Oeste (mezanino), para Bab_Cab

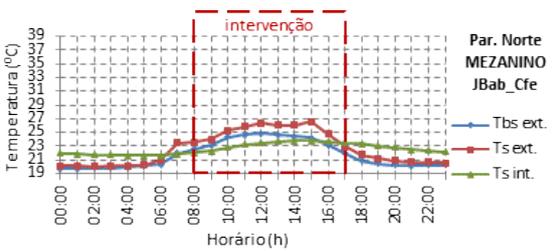


Figura 70- t_s ext e t_s int da parede Norte (mezanino), para JBab_Cfe

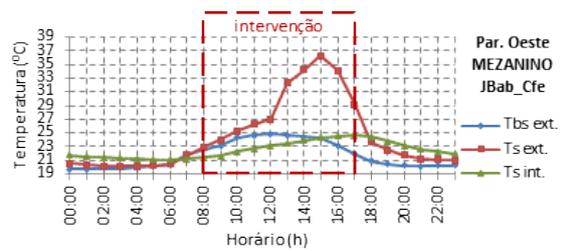


Figura 71- t_s ext e t_s int da parede Oeste (mezanino), para JBab_Cfe

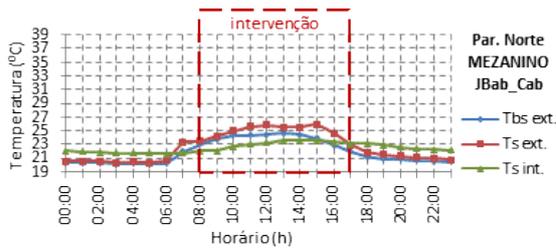


Figura 72- t_s ext e t_s int da parede Norte (mezanino), para JBab_Cab

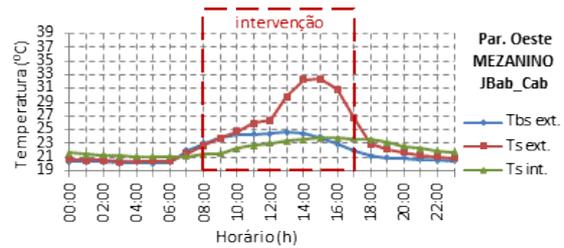


Figura 73- t_s ext e t_s int da parede Oeste (mezanino), para JBab_Cab

Comparando as médias para cada tratamento das temperaturas superficiais externas (t_s ext) da parede Norte do mezanino com as da sala, é possível observar comportamentos desiguais. Tendo os dados, a cada hora, por tratamento, sido coletados simultaneamente, infere-se que tal disparidade observada é resultante da localização relativa dos sensores frente às zonas mais ou menos sombreadas, como apresentado na Figura 63; é imprescindível, então, lembrar que o sensor de medição da t_s ext das paredes da sala distava 1,50 m do piso inferior enquanto o do mezanino, 1,50 m do piso superior; mais próximo, portanto, do beiral da cobertura.

A diferença entre a t_s ext máxima da parede voltada para Norte e t_{bs} exterior máxima varia entre 1,2 °C e 2,2 °C.

As curvas de t_s ext. para a parede Oeste do mezanino possuem, nos cinco tratamentos, trajetórias similares às de t_{bs} exterior, entre 0:00 h e 9:00 h, com valores médios, a cada hora, muito próximos; isto ocorre em razão da parede estar sombreada em sua totalidade; após este período verifica-se o afastamento dessas trajetórias até que, a partir das 12:00 h, as diferenças entre t_s ext. e t_{bs} exterior aumentam chegando a valores entre 6,8 °C e 13 °C, por volta das 15:00 h.

Os valores máximos de t_s int. para as paredes Norte e Oeste do mezanino foram 24,7 °C e 25,8 °C, respectivamente; a amplitude térmica máxima referente à t_s int foi de 2,9 °C para a parede orientada ao Norte e 4,6 °C para a parede voltada a Oeste.

4.4.3.2 Temperaturas superficiais da cobertura

As curvas geradas para as temperaturas superficiais superior (t_s sup) e inferior (t_s inf) da cobertura apresentam dois padrões de comportamento distinto ao longo do dia, que podem ser agrupados nos períodos limitados entre 6:00 h e 18:00 h. Tais padrões - diretamente relacionados à incidência da radiação solar direta e às propriedades térmicas do material cerâmico - no entanto, são similares para todos os tratamentos estabelecidos, conforme se observa nas Figuras 74 a 78.

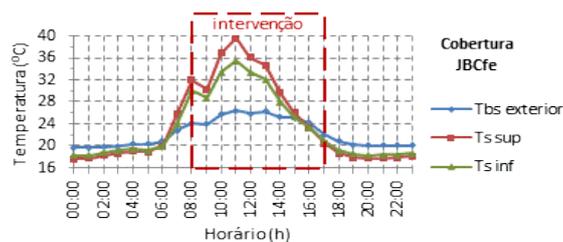


Figura 74- t_s sup e t_s inf, para JBCfe

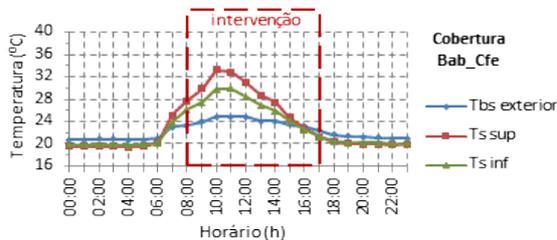


Figura 75- t_s sup e t_s inf, para Bab_Cfe

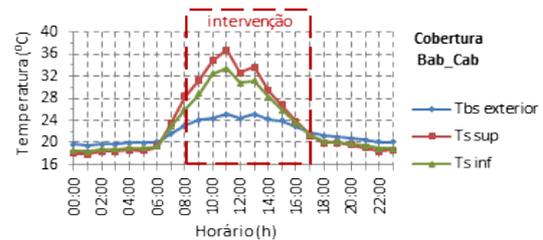


Figura 76- t_s sup e t_s inf, para Bab_Cab

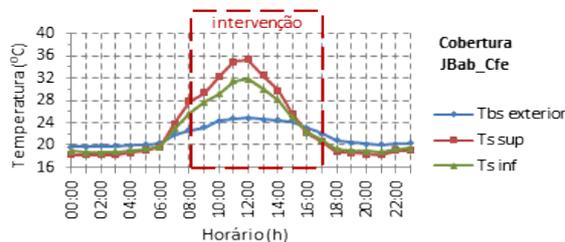


Figura 77- t_s sup e t_s inf, para JBab_Cfe

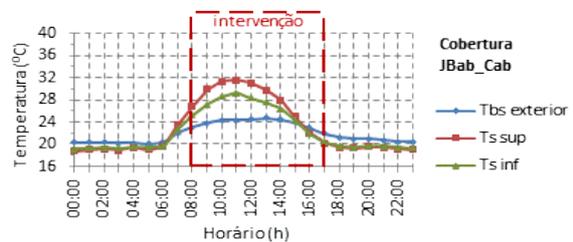


Figura 78- t_s sup e t_s inf, para JBab_Cab

Durante a noite as temperaturas superficiais, que permanecem sempre abaixo da temperatura do ar exterior, apresentam, a cada hora, valores médios muito próximos, em função da combinação entre porosidade e alta transmitância térmica das coberturas em telhas cerâmicas sem forro ($U= 4,55 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$); as telhas cerâmicas não esmaltadas permitem, por serem porosas,

a absorção do vapor d'água presente no ar em grande quantidade no período noturno. Chama-se a atenção para o fato de que as temperaturas médias superficiais inferiores foram ligeiramente maiores que as superiores, de vez que, à noite, as médias horárias de t_{bs} interior foram mais elevadas que as de t_{bs} exterior, alterando o sentido do fluxo de calor nas trocas térmicas.

No decorrer do dia, quando há radiação solar incidindo sobre o plano de cobertura, os valores médios registrados das temperaturas superficiais ultrapassam os de t_{bs} exterior; a cor da face externa do elemento - diretamente ligada à sua absorvância e o grau de inclinação da coberta justificam tal ocorrência, enquanto o valor de absorvância ($\alpha=0,75$) empregado para telhas em barro cozido na cor natural representa seu poder de reflexão de apenas 25% da radiação solar direta incidente.

Francisco (2009) testou o uso de telhas com absorvância diferentes ($\alpha=0,30$ e $\alpha=0,70$) e concluiu que, independente da taxa de ventilação adotada, o uso de telhas cerâmicas com cores mais claras ($\alpha=0,30$) colaborou para tornar o ambiente interno mais confortável termicamente possibilitando a diminuição dos ganhos internos de calor pela incidência da radiação solar.

Herrera (2008) constatou que os maiores valores de temperatura superficial externa em coberturas são registrados sempre no mesmo horário (12:00 h) em que a radiação solar global atinge seu valor mais elevado, porém as médias das temperaturas superficiais externas nos cinco tratamentos, atingiram o pico por volta das 11:00 h quando é maior o ângulo de incidência solar em função do plano da cobertura inclinado 25° em relação ao plano horizontal (Figura 79).

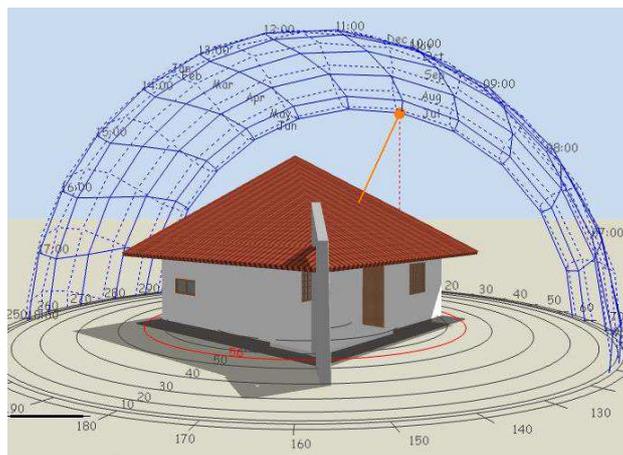


Figura 79- Simulação da posição solar no dia 20/06 às 11:00 h
Fonte: Gerado pelo DesignBuilder, versão 3.2.0.073 (educacional)

Em relatório técnico disponibilizado pelo Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV, 2012), consta que em telhados de duas águas o ângulo de inclinação das coberturas exerce maior influência sobre as necessidades de resfriamento do ambiente interno, que sua orientação.

A média máxima da temperatura superficial superior atinge o valor de 39,6 °C durante o tratamento JBCfe, em virtude das médias de t_{bs} exterior terem sido mais altas neste período, conforme apresentado na Tabela 41.

Tabela 41- Valores limites das temperaturas superficiais da cobertura, amplitude (A) e atraso térmico (ϕ), para cada tratamento

Trat.	Dados	t_{bs} exterior	t_s sup.	t_s inf.	ϕ
JBCfe	T máx. (°C / h)	26,4 / 11:00	39,6 / 11:00	35,5 / 11:00	< 1 hora
	T mín. (°C / h)	19,6 / 1:00	17,7 / 1:00	18,3 / 1:00	< 1 hora
	A (°C)	6,8	21,9	17,2	-----
Bab_Cfe	T máx. (°C / h)	24,9 / 12:00	33,3 / 10:00	29,9 / 11:00	1 hora
	T mín. (°C / h)	20,7 / 4:00	19,4 / 4:00	19,6 / 4:00	< 1 hora
	A (°C)	4,2	13,9	10,3	-----
Bab_Cab	T máx. (°C / h)	25,2 / 11:00	36,7 / 11:00	33,4 / 11:00	< 1 hora
	T mín. (°C / h)	19,4 / 1:00	17,8 / 1:00	18,4 / 1:00	< 1 hora
	A (°C)	5,8	18,9	15,0	-----
JBab_Cfe	T máx. (°C / h)	24,9 / 12:00	35,3 / 12:00	31,8 / 12:00	< 1 hora
	T mín. (°C / h)	19,6 / 1:00	18,2 / 1:00	18,7 / 1:00	< 1 hora
	A (°C)	5,3	17,1	13,1	-----
JBab_Cab	T máx. (°C / h)	24,6 / 13:00	31,6 / 11:00	29,2 / 11:00	< 1 hora
	T mín. (°C / h)	20,1 / 3:00	18,8 / 0:00	19,1 / 0:00	< 1 hora
	A (°C)	4,5	12,8	10,1	-----

Verifica-se que a cobertura analisada possui baixo atraso térmico $\phi < 1$ hora, resultado coerente com o valor normatizado na NBR 15220:3 (ABNT, 2005) de maneira que toda alteração de temperatura registrada na face superior da cobertura, nos cinco tratamentos, foi simultaneamente anotada na face inferior da mesma.

Convém atentar que maior amplitude térmica de t_s sup. está relacionada a valores mais elevados de amplitudes da t_{bs} exterior e da t_s inf., em que esta última se mostrou, em média, 23% menor que t_s sup.

A fim de amenizar as trocas de calor com a cobertura recomenda-se acrescentar substratos isolantes ou forros com áticos ventilados ao sistema de cobertura adotado, medida que, sem dúvida, minimizaria a perda de calor para a cobertura no período noturno, quando alguns índices sinalizam existência de

desconforto por frio e o ganho de calor, principalmente pelo mezanino, no período entre 10:00 h e 14:00 h, quando é prevista a possibilidade de desconforto por sensação de calor.

4.5 Calibração do modelo computacional

É imprescindível lembrar que, a cada hora, a média de t_{bs} exterior coletada difere da t_{bs} exterior simulada visto que cada período de simulação (correspondente a cada tratamento) foi escolhido dentro de um arquivo climático de ano típico, em função da semelhança entre t_{bs} média e t_{bs} mínima diária.

Comparando as curvas geradas para t_{bs} exterior coletada e t_{bs} exterior simulada (Figura 80), para o tratamento JBCfe, é possível verificar que existe um retardo na ocorrência tanto da t_{bs} média máxima quanto da t_{bs} média mínima; enquanto a máxima coletada ocorre por volta de 11:00 h e a mínima próximo a 1:00 h a simulada acontece em torno de 15:00 h e 6:00 h, respectivamente, evento que se reflete no período em que t_{bs} média simulada se encontra dentro da zona de conforto; ao passo que t_{bs} SALA e t_{bs} MEZ coletadas indicam conforto entre 8:00 h e 16:00 h, as simuladas apenas entre 11:00 h e 19:00 h.

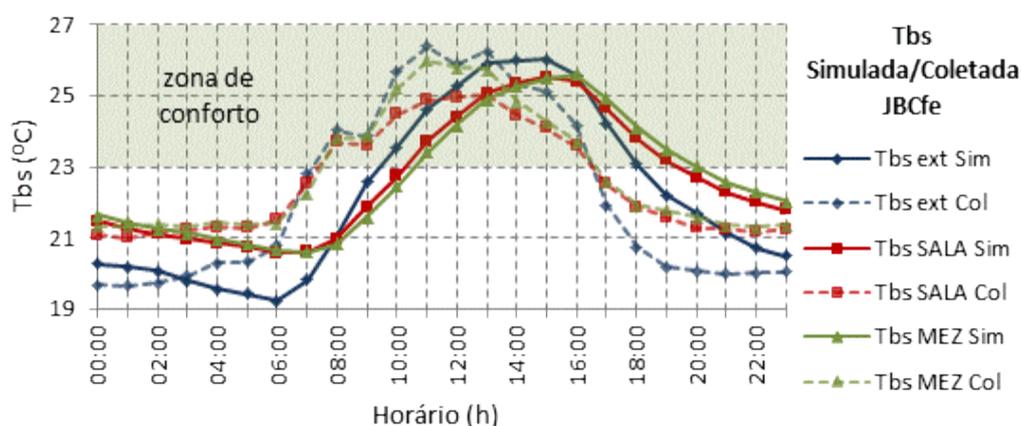


Figura 80- Curvas das t_{bs} médias simuladas e coletadas, para JBCfe

Esses retardos na t_{bs} e no intervalo dentro da zona de conforto das médias coletadas e simuladas foram notados em todos os tratamentos, o que

aponta para a compatibilidade dos resultados simulados em função das alterações climáticas externas, fato passível de ser verificado pela análise das Figuras 81 a 84.

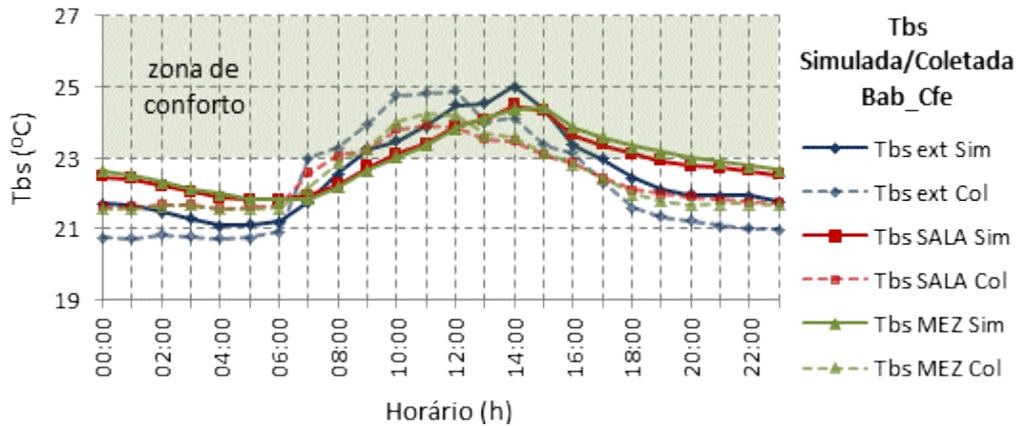


Figura 81- Curvas das t_{bs} médias simuladas e coletadas, para Bab_Cfe

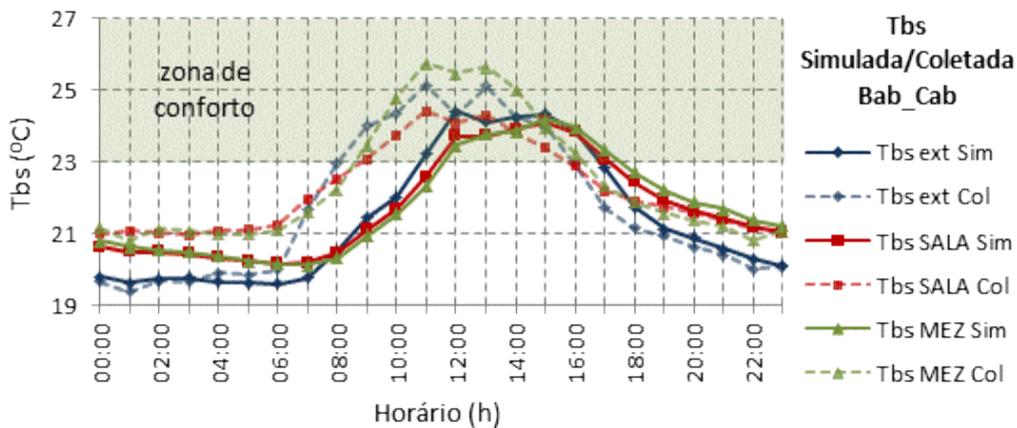


Figura 82- Curvas das t_{bs} médias simuladas e coletadas, para Bab_Cab

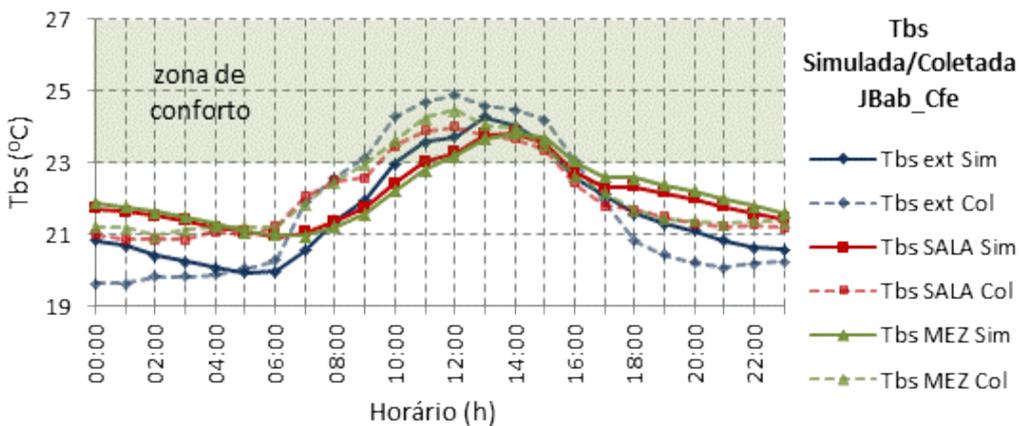


Figura 83- Curvas das t_{bs} médias simuladas e coletadas, para JBab_Cfe

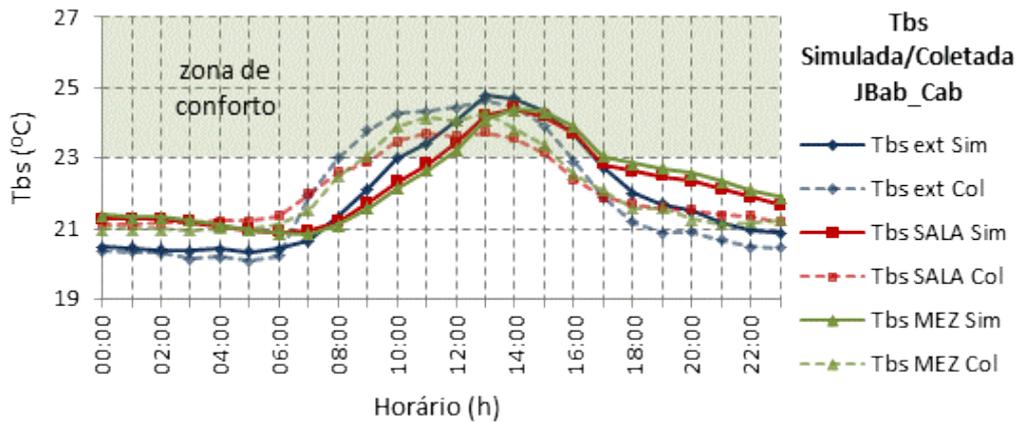


Figura 84- Curvas das t_{bs} médias simuladas e coletadas, para J Bab_Cab

As diferenças médias durante o tratamento JBCfe foram na grandeza de $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o exterior e $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ para sala e mezanino. Esta aproximação, bem representada pelo comportamento similar das curvas das diferenças de temperatura para JBCfe apresentadas na Figura 85, serve como outro indicativo de calibração satisfatória do modelo.

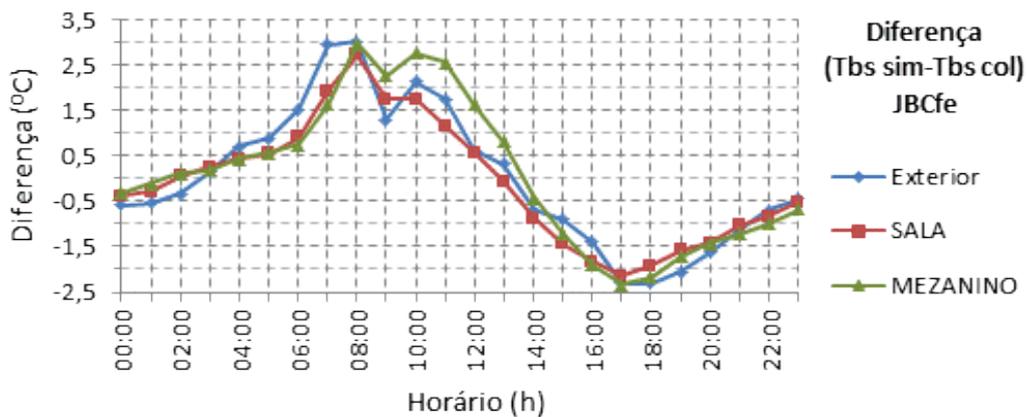


Figura 85- Curvas das diferenças entre t_{bs} médias coletadas e simuladas, para JBCfe

As diferenças médias para Bab_Cfe foram da ordem de $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o exterior, $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para sala e $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para mezanino enquanto para Bab_Cab, de $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para exterior, $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para sala e $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ para mezanino, tendo sido os maiores valores encontrados para todo o período experimental; as diferenças médias para JBab_Cfe alcançaram $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o exterior e sala, sendo de $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para mezanino, já em JBab_Cab os erros médios foram de $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para

exterior e 0,1 °C para sala e mezanino; enfim, as curvas das diferenças a cada hora, para cada tratamento, estão apresentadas nas Figuras 86 a 89.

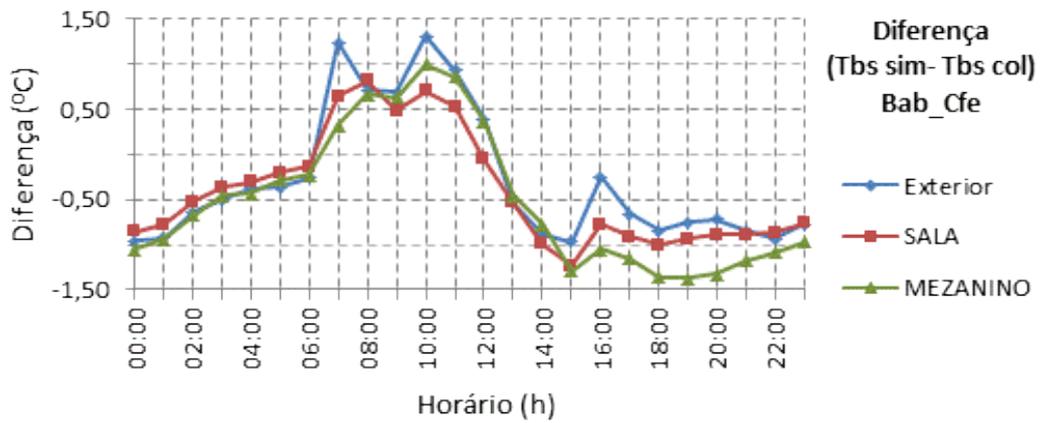


Figura 86- Curvas das diferenças entre t_{bs} médias coletadas e simuladas, para Bab_Cfe

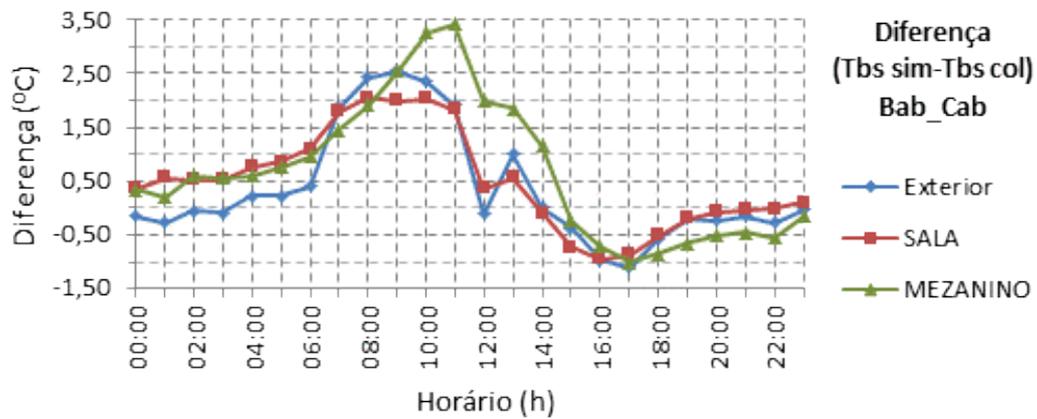


Figura 87- Curvas das diferenças entre t_{bs} médias coletadas e simuladas, para Bab_Cab

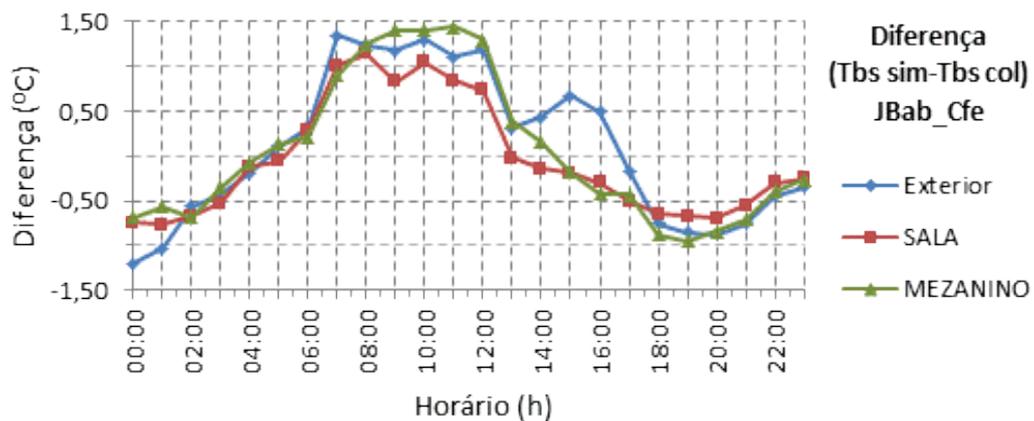


Figura 88- Curvas das diferenças entre t_{bs} médias coletadas e simuladas, para JBab_Cfe

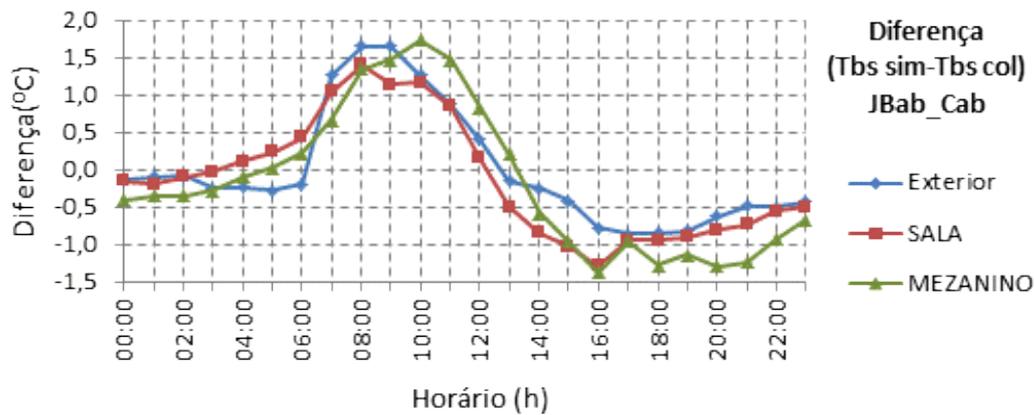


Figura 89- Curvas das diferenças entre t_{bs} médias coletadas e simuladas para J Bab_Cab

As maiores diferenças médias - identificadas nos tratamentos Bab_Cfe e Bab_Cab, podem estar relacionadas à disparidade na forma como se dá a distribuição do ar no interior dos ambientes, em função da disposição do vão, na bandeira real e modelada.

Na edificação real a entrada de ar ocorre ao longo do comprimento da bandeira - por suas partes superior e inferior (Figura 90). Na simulada a abertura para o fluxo de ar é assumida como sendo uma lacuna no lado da janela, ao longo da altura total do vão (DESIGNBUILDER, 2013).

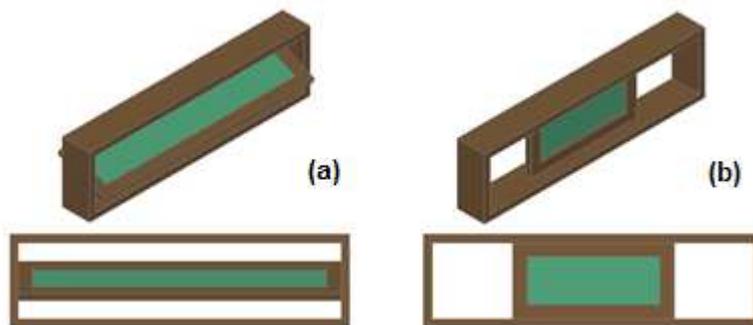


Figura 90- Forma de abertura das bandeiras na condição real (a) e na simulada (b)

Sobin (1981) concluiu, em sua investigação sobre a influência de três formas de aberturas (horizontal, quadrada e vertical) no movimento de ar no interior dos ambientes, que para um mesmo percentual de abertura entradas de ar horizontais, quando comparadas com entradas quadradas e verticais, aumentam a eficácia da ventilação apresentando maior rendimento para todos os ângulos de incidência do vento.

Outra provável justificativa é a subestimação do percentual de abertura (50%) adotado para as bandeiras; visto que os vetores do vento são multidirecionais, as folhas móveis das bandeiras podem atuar como elementos orientadores no processo de captação da ventilação, como ilustra a Figura 91 e, sendo assim, seria mais apropriado considerar a abertura em sua integralidade (100%).

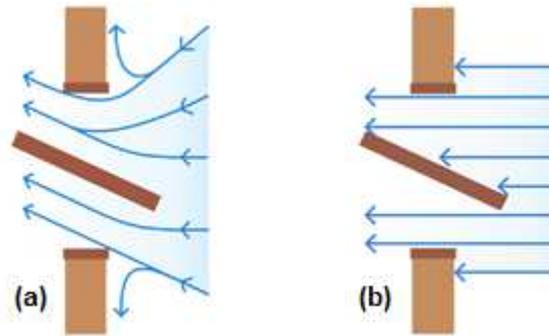


Figura 91- Captação do vento por bandeiras com eixo pivotante horizontal na condição real 100% (a) e na simulada 50%(b)

Em JBCfe a amplitude térmica coletada, tendo-se em conta a diferença entre as temperaturas médias (máxima e mínima) do período, para o exterior foi de 6,8 °C, para a sala foi de 4,0 °C e para o mezanino, 4,7 °C; na simulação esses valores foram de 6,7 °C, 4,9 °C e 5,0 °C, na mesma ordem (Figura 92).

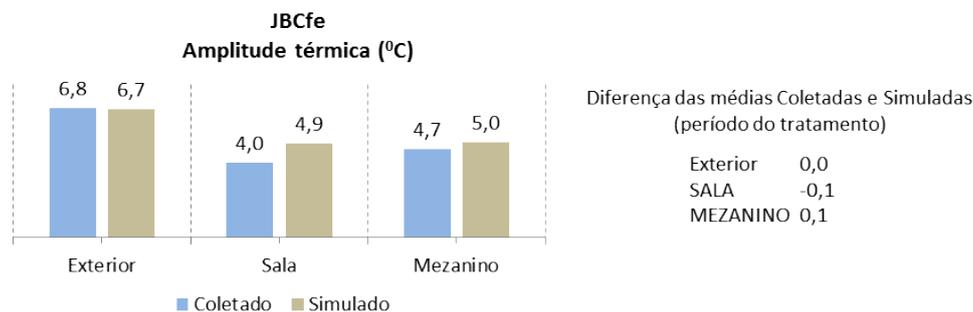


Figura 92- Amplitude térmica e diferença das médias de t_{bs} coletada e simulada para cada ambiente, durante JBCfe

Para o tratamento Bab_Cfe a amplitude coletada foi 4,2 °C para o exterior, 2,3 °C para a sala e 2,7 °C para o mezanino; na simulação esses valores foram de 3,9 °C, 2,7 °C e 2,5 °C, respectivamente (Figura 93).

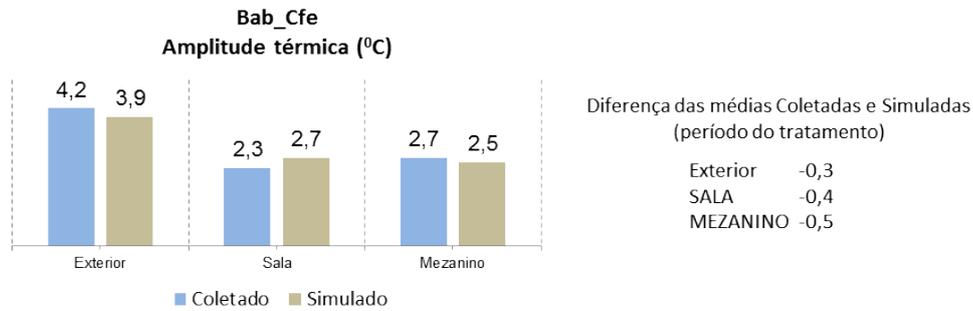


Figura 93- Amplitude térmica e diferença das médias de t_{bs} coletada e simulada para cada ambiente, durante Bab_Cfe

Durante Bab_Cab foi registrada amplitude térmica de 5,8 °C para o exterior, 3,4 °C para a sala e 4,9 °C para o mezanino enquanto na simulação, 6,7 °C, 4,9 °C e 5,0 °C, respectivamente (Figura 94).

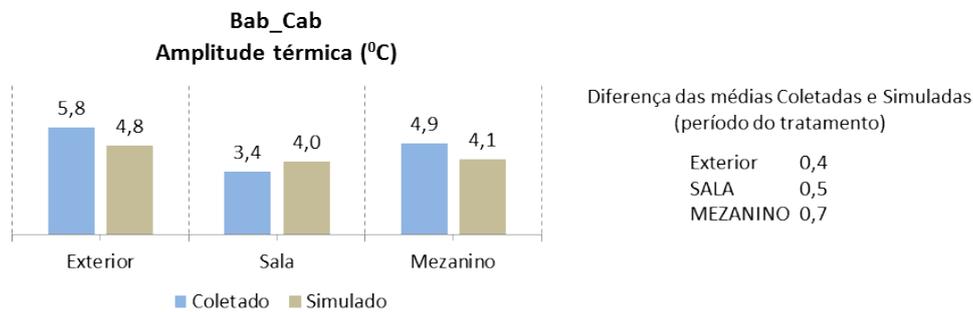


Figura 94- Amplitude térmica e diferença das médias de t_{bs} coletada e simulada para cada ambiente, durante Bab_Cab

Em JBab_Cfe a amplitude térmica coletada para o exterior foi de 5,3 °C, para a sala foi de 3,2 °C e para o mezanino 3,5 °C; na simulação esses valores foram de 4,3 °C, 2,9 °C e 2,8 °C, na mesma sequência (Figura 95).

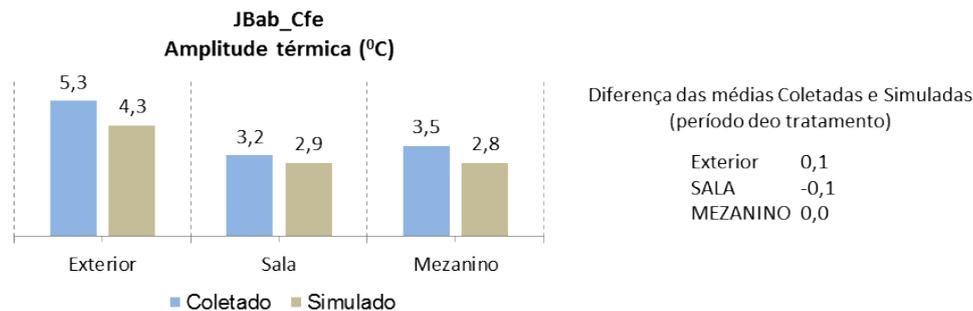


Figura 95- Amplitude térmica e diferença das médias de t_{bs} coletada e simulada para cada ambiente, durante JBab_Cfe

Para o quinto tratamento - JBab_Cab - as amplitudes térmicas, coletada e simulada foram, respectivamente, 4,6 °C e 4,4 °C para exterior, 2,5 °C e 3,5 °C para sala e 3,3 °C e 3,6 °C para mezanino (Figura 96).

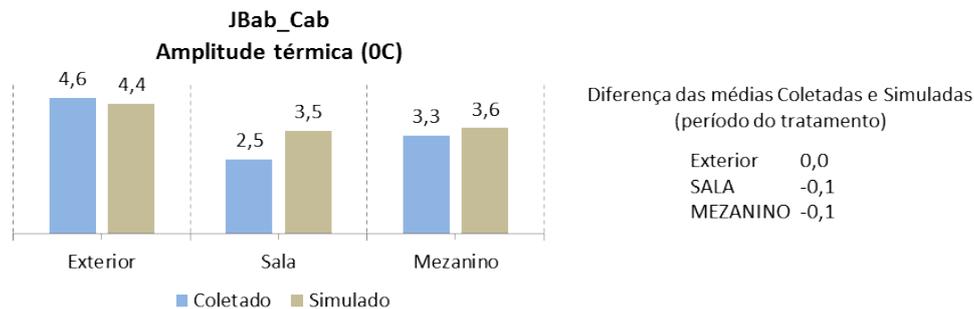


Figura 96- Amplitude térmica e diferença das médias de Tbs coletada e simulada para cada ambiente, durante JBab_Cab

Em resumo, a diferença máxima entre as amplitudes coletada e simulada foi da ordem de 1 °C para a sala (JBab_Cab) e 0,8 °C para o mezanino (Bab_Cab) enquanto o erro médio máximo foi de 0,5 °C e 0,7 °C, para sala e mezanino (Bab_Cab), respectivamente.

Pereira e Ghisi (2010) realizaram coleta simultânea de dados de variáveis ambientais ao longo de um ano, tanto no interior quanto no exterior da “Casa Eficiente”, localizada em Florianópolis; a partir dos dados externos geraram um arquivo climático para EnergyPlus que foi utilizado no processo de calibração de um modelo computacional; ao final da calibração a amplitude térmica coletada para sala foi de 2,1 °C, de 2,6 °C para quarto e 1,7 °C para banheiro; na simulação esses valores foram de 4,3 °C, 2,6 °C e 3,6 °C, na mesma ordem; as diferenças médias no período foram da grandeza de 0,2 °C para sala, 0,4 °C para quarto e 0,5 °C para banheiro.

Diante da proximidade entre os valores finais encontrados por Pereira e Ghisi (2010) e os resultados obtidos na atual pesquisa, o modelo computacional aqui proposto foi considerado satisfatoriamente calibrado; entretanto, para resultados plenamente confiáveis sugere-se a utilização de arquivo climático gerado a partir de dados do ambiente externo coletados no decorrer do experimento.

Em caso de realização de simulações paramétricas os resultados que menos se aproximam dos reais serão decorrentes da aplicação do tratamento Bab_Cab, em função dos erros médios máximos obtidos na calibração.

5 CONCLUSÕES

A temperatura do ar na sala e no mezanino da unidade experimental durante todo o período de medição, se manteve dentro da zona de conforto no intervalo entre 9:00 h e 15:00 h; fora desta faixa foram registradas baixas temperaturas do ar no interior dos recintos.

Altas temperaturas externas, baixas taxas de ventilação por bandeiras associadas ao “efeito chaminé”, induziram ao aumento de temperatura do mezanino; há que se atentar para adequação da localização e do dimensionamento das aberturas de exaustão.

O uso de índices que consideram a velocidade do vento indiretamente por sua influência sobre t_{bs} , t_{bu} e t_{gn} , não possibilitou a verificação do efeito dos tratamentos sobre a sensação de conforto térmico interno.

Segundo o DI e o THI, sala e mezanino são caracterizados como desconfortáveis por frio, quando da realização de atividades leves por pessoas vestidas com roupas normais de trabalho.

Para o WBGT, em todos os padrões de ventilação estabelecidos os ambientes avaliados são toleráveis à realização de atividades com taxa metabólica acima de 200 W.m^{-2} , em regime intermitente de trabalho, sem prejuízos à saúde e à produtividade humana.

Segundo o PMV/PPD e o PET, sala e mezanino foram caracterizados como confortáveis no período noturno. Ao longo do dia e se considerando prováveis usuários em pé desempenhando atividades domésticas, a condição de conforto na sala é máxima desde que as bandeiras permaneçam abertas e os combogós fechados (Bab_Cfe), já o mezanino apresentou desconforto no intervalo compreendido entre 8:00 e 17:00 h, independente do padrão de manipulação estabelecido.

Analisando sala e mezanino simultaneamente conclui-se que JBCfe, seguido por JBab_Cfe, foi o tratamento menos eficiente para manutenção do conforto térmico interno enquanto os que apresentaram os melhores resultados (Situação 1 e 2) foram Bab_Cfe e JBab_Cab.

Extrapolando os resultados obtidos da análise de sala e mezanino, segundo o método de avaliação simplificada, pode-se afirmar que a unidade

habitacional atende aos requisitos estabelecidos nas normas brasileiras de desempenho térmico.

Todas as paredes analisadas, independente de sua orientação, apresentaram comportamento térmico previsto tendo em vista sua alta resistividade e refletividade superficial; mesmo aquelas voltadas a Leste e a Oeste não registraram valores de temperatura superficial interna máxima fora da faixa de temperatura do ar considerada confortável para o ser humano, o mesmo não ocorrendo para o período noturno quando as temperaturas superficiais internas atingiram valores inferiores ao recomendado.

As temperaturas superficiais internas (máximas e mínimas) da cobertura alcançaram, em todos os tratamentos, valores fora do limite recomendado para temperatura interna, isso demonstrando a inadequação da cobertura adotada para garantia e/ou manutenção do conforto interno.

Portanto, a especificação de paredes e cobertura com maior inércia e atraso térmico, juntamente com a adição de substratos isolantes ou forros com áticos ventilados ao sistema de cobertura, são medidas adaptativas ou corretivas apropriadas.

As configurações adotadas e os ajustes propostos possibilitaram calibrar um modelo computacional satisfatório para utilização em estudos paramétricos acerca do conforto térmico na edificação analisada.

6 PROPOSTAS PARA ESTUDOS COMPLEMENTARES

- Estudo sobre o comportamento térmico de ambientes e elementos construtivos referentes ao período de verão para verificação da compatibilidade entre as conclusões apresentadas neste trabalho e os dados experimentais coletados nos meses mais quentes do ano;
- Análise da influência das rotinas estabelecidas para manipulação das aberturas de ventilação e dos materiais do envelope construtivo sobre comportamento e desempenho térmico de todos os ambientes da habitação objeto deste estudo, durante os períodos de verão e inverno;
- Avaliação dos efeitos sobre o conforto térmico interno desta residência, advindos da utilização de materiais tradicionais, reciclados ou reutilizados, aplicados em subsistemas construtivos por meio do monitoramento das variáveis ambientais;
- Estudo comparativo por meio de monitoramento ambiental simultâneo entre comportamento e desempenho térmico desta habitação (que incorpora proposta de redesenho) e de uma casa padrão aprovada por programa habitacional e adotada pela gestão municipal;
- Estudos de comportamento e desempenho térmico através de simulações computacionais incluindo diversas alterações projetuais, testes de uso de materiais alternativos e técnicas construtivas não convencionais, incluindo aqueles desenvolvidos em pesquisas acadêmicas anteriores;
- Estudos utilizando modelagem virtual e simulações de verificação e adequação do projeto desta unidade residencial experimental, para viabilização de sua implementação em outras cidades integrantes do Semiárido paraibano, com características climáticas diversificadas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 16^a. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades: NBR 15220-1**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações: NBR 15220-2**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social: NBR 15220-3**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. NBR 15575**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas. NBR 15575**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. NBR 15575**. Rio de Janeiro, 2013.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, Atlanta. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Capítulo 8: Thermal Comfort: ASHRAE. Atlanta, 2005.

_____. **Thermal Environmental conditions for human occupancy: ASHRAE 55**. Atlanta, 2004.

BARROSO-KRAUSE, C. et al. **Bioclimatismo no projeto de arquitetura: dicas de projeto**. Rio de Janeiro: FAU-UFRJ, 2005.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R. Classificação do desempenho térmico da casa eficiente: avaliação segundo as normas brasileiras. In: Lamberts, R. et al. **Casa eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010. p. 19-35.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Ventilação Natural em edificações**. Rio de Janeiro: PROCEL EDIFICA, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Brasília: INMET, 2009. 465p.

_____. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional. **Nova delimitação do Semiárido brasileiro**. Brasília: SDR, 2005. 32p.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 3751 de 23 de novembro de 1990. Estabelece parâmetros que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, de modo a proporcionar um máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente: NR 17 - Ergonomia. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 nov. 1990.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 3214 de 08 de junho de 1978. Aprova as Normas Regulamentadoras - NR - do Capítulo V, Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativas a Segurança e Medicina do Trabalho: NR 15 - Atividades e Operações Insalubres. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 06 jul. 1978.

BUDD, G. Wet-bulb globe temperature (WBGT): its history and its limitations. **Journal of Science and Medicine Sports**, Sydney, v. 11, p. 20-32, 2008.

CARVALHO, P. P. **Desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social com paredes de concreto armado na zona bioclimática 2 brasileira**. Santa Maria, 2012. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil e Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

CONTI, J. B. **Clima e meio ambiente**. 7^a. ed. São Paulo: Atual, 2011.

CORBELLA, O.; CORNER, V. **Manual da arquitetura bioclimática tropical**. Rio de Janeiro: Revan, 2011.

CTCV - Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro. **Estudo do comportamento térmico das coberturas com telhas cerâmicas**. Coimbra, 2012. Disponível em: <http://www.apicer.pt/apicer/admin/EXPLORER/ficheiros/pdf/estudos/Estudo_Comportamento_Termico.pdf> Acesso em : 08 jul de 2013.

DESIGNBUILDER SOFTWARE. **ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 building thermal envelope and fabric load test**. DesignBuilder version 3.0, 2011. Disponível em: <http://www.designbuilder.co.uk/component/option,com_docman/task,cat_view/gid,20/Itemid,30/> Acesso em: 8 jul 2013.

FANGER, P. **Thermal Comfort**. New York: McGraw-Hill, 1972.

FRANCISCO, M. do L. **Recomendações de conforto térmico para projeto arquitetônico e implantação de unidade habitacional em assentamentos rurais**. São Carlos, 2009. 182 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

FRANCISCO, P. R. M. **Classificação e mapeamento das terras para mecanização agrícola do Estado da Paraíba utilizando sistema de informações geográficas**. Areia, 2010. 107 p. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2010.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual do conforto térmico**. 5^a. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture**. 2^a. ed. London: Applied Science Publishers LTD, 1976.

GRZYBOWSKI, G. T. **Conforto térmico nas escolas públicas em Cuiabá-MT: estudo de caso**. Cuiabá, 2004. 97 p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2004.

HERRERA, J. A. Q. **Aplicação da climatologia dinâmica ao estudo do comportamento térmico das edificações, caso específico: telhas produzidas a partir da reciclagem de caixas acartonadas**. São Carlos, 2008. 140 p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

HÖPPE, P. R. The Physiological Equivalent Temperature: a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International Journal of Biometeorology**, Dordrecht, v. 43, p. 71-75, 1999.

ISO - INTERNATIONAL STANDARD, Geneva. **Ergonomics of the thermal environment: analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: ISO 7730**. Geneva, 2005.

_____. **Ergonomics of the thermal environment: determination of metabolic rate: ISO 8996**. Geneva, 2004.

_____. **Hot environments: estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT index (Wet Bulb Globe Temperature): ISO 7243**. Geneva, 1989.

IVANÓSKI, C. G. **Um modelo de processo de projeto e produção de edifícios verticais, com uma visão “pavimentar” e de “interface horizontal”, visando integração entre layout de fachada e conforto**. Florianópolis, 2004. 252 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

KRÜGGER, E. L. et al. Estudo de conforto em espaços abertos em região de clima temperado: o caso de Glasgow, Reino Unido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 7-25, 2012.

LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos**. Florianópolis, 2012. Disponível em: <www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw> Acesso em: 8 jul 2013.

LAMBERTS, R. et al. **Desempenho térmico de edificações**. Florianópolis, 2005. 82 p. Apostila da Disciplina ECV 5161, Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

LAMBERTS, R. et al. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW Editora, 1997a.

LAMBERTS, R. et al. A. Eficiência energética: estudo de retrofit para um edifício comercial em Florianópolis. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 4., 1997, Salvador. **Anais...** Salvador, 1997b. p. 424-428.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A. D. P. **Conforto térmico e stress térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2002.

LIMA, R. V. dos S. **A influência de decisões arquitetônicas na eficiência energética do Campus/UFRN- vol.1**. Natal, 2007. 221 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do rio Grande do Norte, Natal, 2007.

_____. **Treinamento para o programa DesignBuider versão 2.0**. Natal, s.d. 83 p. Apostila do Laboratório de Conforto Ambiental, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do rio Grande do Norte, Natal, s.d.

MASCARELLO, V. L. D. **Princípios bioclimáticos e princípios de arquitetura moderna- evidências no edifício hospitalar**. Porto Alegre, 2005. 147 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MATOS, M. **Simulação computacional do desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando ventilação natural**. Florianópolis,

2007. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MELO, E. de C.; LOPES, D. de C. **GRAPSI- Programa para cálculo das propriedades psicrométricas do ar mediante o conhecimento de duas variáveis, versão 8.1.1.** Viçosa: Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade de Viçosa, 2007.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia:** noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. **Questões teóricas de conforto térmico em espaços abertos:** consideração histórica, discussão do estado da arte e proposição de classificação de modelos. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 43-58, 2007.

MONTEIRO, L. M. **Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos.** São Paulo, 2008. 378 p. Tese (Doutorado em Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

NASCIMENTO, S. S. D.; ALVES, J. J. A. Ecoclimatologia do Cariri paraibano. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, n. 3, p. 28-41, 2008.

NICOL, F. **Thermal comfort:** a handbook for field studies toward an adaptive model. London: University of East London, 1993.

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima:** manula de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. 1ª. ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2008.

OLIVEIRA, L. M. F. et al. Zoneamento bioclimático da região sudeste do Brasil para o conforto térmico animal e humano. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 3, p. 823-831, 2006.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. Simulações da Casa Eficiente após sua construção. In: Lamberts, R. et al. **Casa Eficiente: Simulação computacional do**

desempenho termo-energético. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010, p. 27 a 50.

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano.** [S.l.]: CopyMarket.com, 2000.

RORIZ, M. **Conforto e desempenho térmico de edificações.** São Carlos, 2008. 61 p. Apostila da Disciplina Conforto e desempenho térmico de edificações, Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

RUAS, A. C. **Avaliação de conforto térmico:** contribuição à aplicação prática das normas internacionais. Campinas, 2001. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

RUTZ, F. et al. **RayMan- Modelling of Mean Radiant Temperature in urban Structure Calculation of thermal indices, version 1.2.** Freiburg: Meteorological Institute, University of Freiburg, 2000.

SADAFI, N. et al. Evaluating thermal effects of internal courtyard in a tropical terrace house by computational simulation. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 887-893, 2011.

SCHMID, A. L. **A ideia de conforto:** reflexões sobre o ambiente construído. Curitiba: Pacto Ambiental, 2005.

SILVA, R. A. et al. Caracterização da flora apícola do Semiárido da Paraíba. **Archivos de Zootecnia**, v. 57, n. 220, p. 427-438, 2008.

SOBIN, H. Window Design for Passive Ventilation. In: INTERNATIONAL PASSIVE AND HYBRID COOLING CONFERENCE, 1981. **American Section of ISES.** Newark: 1981.

SORANO, E.C. **Ergonomia de quadras urbanas:** condição térmica do pedestre. Bauru, 2009. Dissertação (Mestrado em Design) - Faculdade de

Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2009.

SUASSUNA, J. **Semiárido: proposta de convivência com a seca**. Recife, 2002. Disponível em: <http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=659&Itemid=376> Acesso em: 08 jul. 2013.

THOM, E. C. **The Discomfort Index**. Weatherwise, Washington, p. 57-60, april 1959.

TRINDADE, S. C. et al. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente Construído (on line)**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, 2010.

TROLEIS, A. L.; SANTOS, A. C. V. D. **Estudos do Semiárido**. 2ª. ed. Natal: EDUFRN, 2011.

TYLER, H. et al. **CBE Thermal Comfort Tool**. Berkeley: Center for the Built Environment, University of California, 2013. Disponível em: <<http://cbe.berkeley.edu/comforttool>> Acesso em: 8 jul 2013.

VIANA, M. P. **Análise do comportamento térmico do forro de resíduo de composto EVA+SBR em habitação de interesse social na cidade de Campina Grande – PB**. Campina Grande, 2011. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

XAVIER, A. A. de P. **Predição de conforto térmico em ambientes internos com atividades sedentárias**: teoria física aliada a estudos de campo. Florianópolis, 2000. 251 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

YAGLOU, C.; MINARD, D. Control of heat casualties at military training centers. **Archives of Industrial Health**, v. 16, p. 302-305, 1957.

YOSHIDA, R. **Das normas em conforto térmico ao projecto de arquitectura**: estudo de caso para edifícios de habitação - zona bioclimática brasileira Z3- Brasil. Lisboa, 2006. 232 p. Dissertação (Mestrado em Arquitectura Bioclimática)- Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.