

DIEGO BOSCHETTI MUSSKOPF

**ESTUDOS EXPLORATÓRIOS SOBRE VENTILAÇÃO
NATURAL POR TUBOS ENTERRADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre
setembro, 2006

DIEGO BOSCHETTI MUSSKOPF

**ESTUDOS EXPLORATÓRIOS SOBRE VENTILAÇÃO
NATURAL POR TUBOS ENTERRADOS**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e foi aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 30 de setembro de 2006.

Prof. Miguel Aloysio Sattler
PhD pela University of Sheffield, UK
Orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Ana Lucia Torres Seroa da Motta (UFF)
Doutora pela University College, London, Londres
Pós-Doutora pela Fachhochschule, Köln, Alemanha

Ana Luiza Raabe Abitante (UFRGS)
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Paulo Renato Perez dos Santos (PUCRS)
Doutor pela Universidade de São Paulo, Brasil
Pós-Doutor pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

AGRADECIMENTOS

Antes de todos, aos meus pais e meu irmão, pela compreensão demonstrada e ajuda prestada ao longo do trabalho, bem como pela estabilidade transmitida nos momentos de crise.

Ao meu orientador, professor PhD. Miguel Aloysio Sattler, por sua dedicação, incentivo e por abrir meus horizontes.

Aos professores Arno Krenzinger, Paulo Renato dos Santos e Paulo Smith Schneider, pelos conselhos, esclarecimentos das dúvidas e auxílio prestados prontamente.

Prof. Jandyra Fachel e sua equipe do Núcleo de Estatística Aplicada (UFRGS).

Aos demais professores do NORIE pelos conhecimentos transmitidos e pelos bons momentos divididos.

Um agradecimento especial ao funcionário do LETA, Batista da Rosa e ao bolsista Rodrigo Danielli pela ajuda prestada de imediato e inesperadamente.

Ao empresário Samuel da Silveira pelo financiamento à construção da edificação, ao Empreiteiro Arno Stein pela mobilização da equipe de obras, ao eletricista Daniel da Silveira pela ajuda, a todos demais funcionários pela companhia e ao Saulo da Silveira pelo apoio e auxílio prestado inúmeras vezes, mas, principalmente, pelos laços de amizade desenvolvidos.

A CAPES (Coordenadoria de Auxílio à Pesquisa e Extensão) pela bolsa de estudos fornecida durante o período de março de 2004 a fevereiro de 2006.

Aos camaradas Joaquim Vaz e Pery Bennet, por compartilharem suas experiências profissionais durante os trabalhos do mestrado e cuja convivência proporcionou um constante aprendizado.

Aos colegas do NORIE, por saberem escutar os problemas, mesmo sem saber muito bem como ajudar (especialmente aqueles com quem eu convivi a maior parte do tempo: Caroline Kehl, Cristiano Richter, Edna Possan, Eugenia Kuhn, Fernanda Moscarelli, Geilma, Nauira Zanardo, Marcos e Maurício Magro – pretendo conviver com vocês por muito tempo ainda).

Aos demais amigos, familiares e todos aqueles que incentivaram ou colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

MUSSKOPF, D. B. **Estudos Exploratórios sobre Ventilação Natural por Tubos Enterrados**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

O uso do solo como massa inercial para condicionamento térmico de edificações por contato direto é uma prática antiga, porém, seu uso como trocador de calor através de dutos enterrados, para ventilação natural de edificações é recente. A prática consiste em enterrar dutos a profundidades entre 0,5m e 1,5m – com extensões e diâmetros variáveis – por onde o ar circula do exterior para o interior dos ambientes através da ação do vento externo e da convecção natural. Durante o trajeto, o ar troca calor com o solo e ingressa no ambiente a temperaturas mais amenas. Embora seja um sistema já empregado na arquitetura bioclimática, existem poucos estudos conclusivos sobre a sua real eficácia. Dessa forma, o objetivo do trabalho é investigar o comportamento higrotérmico de uma edificação construída no sul do Brasil com o sistema e compreender a atuação dos fatores climáticos responsáveis pelo deslocamento de ar no seu interior. O estudo foi realizado através do monitoramento do Protótipo Ventura, localizado em Viamão (Brasil – 30°01'59"S, 51°13'48"W) no período de verão. No deslocamento de ar, foi estudada a influência do vento e da diferença de temperatura nos 2 diâmetros, nas 2 inclinações e nas 2 orientações dos dutos existentes, bem como a influência da chaminé solar. O desempenho higrotérmico foi avaliado comparando o ar na sala ventilada com uma sala de referência (de mesmas dimensões, porém de orientação distinta) e com o exterior. Os resultados demonstram que o solo de Viamão é eficiente para o condicionamento térmico da edificação, pois a pequenas profundidades, ele apresenta uma temperatura mais estável que o ar, próxima à média anual de temperatura do ar local (18°C). Dessa forma, ao passar pelo duto, o ar externo é aquecido nos períodos frios e refrigerado nos períodos quentes, mantendo o ar interno próximo da zona de conforto. Também foi possível observar que o principal fator responsável pelo deslocamento de ar observado é o vento externo, porém as diferenças de temperatura entre as extremidades dos tubos, bem como entre o interior e exterior da edificação, não podem ser desprezadas, pois geram velocidades de mesma magnitude que o primeiro. Por fim, conclui-se que a ventilação da sala reduziu seu retardo térmico, porém não prejudicou o seu conforto térmico, apresentando inclusive uma redução de sua umidade interna.

Palavras chave: tubos enterrados, ventilação natural, condicionamento térmico passivo.

ABSTRACT

MUSSKOPF, D. B. **Estudos Exploratórios sobre Ventilação Natural por Tubos Enterrados**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

The use of the ground as an inertial mass for thermal conditioning of buildings, such as the Italians cellars, is an old practice. However, its use as a heat exchanger with buried pipes for natural indoor ventilation is quite recent. The system uses pipes with variable length and diameter buried at a depth between 0.5m and 1.5m. The air flows through the pipes from the outside to the inside by convection or wind effects. Although it's already a bioclimatic architecture system, there are few conclusive studies about its real effectiveness. The objective of this study is to investigate the benefits of natural ventilation through buried pipes in a building located in the south of Brazil. A prototype building and a buried pipe system have been built and measured during a period in the summer of 2005-2006, in Viamão (30° 01'59"S, 51°13'48"W). The influence of the pipes diameter, inclination and orientation has been studied as well as the thermal comfort indoors. The system is efficient for thermal building conditioning and air renovation. At small depths, the ground presents a more steady temperature than the air, close to the annual average temperature (18°C), cooling the air in hot days, warming it in cold nights – a similar effect is expected on a yearly period. The main factor responsible to the air flow is the outside wind, but the air temperature differences between the pipes, the room and the solar chimney edges are very relevant. The room ventilation reduces its thermal delay without interfering with its thermal performance, and also shows a decrease in its internal humidity.

Keywords: buried pipes, natural ventilation, passive cooling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: delineamento da pesquisa.....	7
Figura 2: exemplo de tubos verticais (esquerda) de tubos horizontais (direita) (fonte: FISK; TURIEL, 1995).....	15
Figura 3: exemplo de sistema aberto com uso de água (esquerda) (fonte: FISK; TURIEL, 1995) e uso de ar (direita) (fonte: SANTAMOURIS et alli, 1995).....	16
Figura 4: esquema do sistema de bombas de calor fonte-ar típico (esquerda) e fonte-solo típico (direita) (fonte: FISK; TURIEL, 1995).....	18
Figura 5: sistema de operação básico das bombas de calor (fonte: FISK; TURIEL, 1995)	19
Figura 6: esquema de ventilação pelo subsolo (fonte: LENGEN, 2004).....	21
Figura 7: gráfico demonstrando os resultados das comparações de logaritmos executado por Tzaferis (fonte: TZAFERIS et alli, 1992).....	24
Figura 8: gráficos demonstrando o calor armazenado no solo em função do conteúdo de umidade (%) (fonte: LOMBARDI, 2005).....	27
Figura 9: gráfico demonstrando os resultados calculados (linha) e medidos (símbolo) para as mudanças dinâmicas no substrato para temp. (esquerda) e conteúdo de água (direita). (legenda: ---- +: 5cm; -.-.- Δ: 15cm; x: 25cm) (fonte: KURUPASKA et alli, 2004)	28
Figura 10: gráfico da curva ideal anual e diária de temperatura do solo e do ar.....	28
Figura 11: gráfico demonstrando as isolinhas de temperatura e conteúdo de água no substrato após 48h (esquerda) e 64h (direita) (fonte: KURPASKA et alli, 2004).....	29
Figura 12: gráfico do calor armazenado no solo em função do comprimento do duto (fonte: LOMBARDI, 2005).....	32
Figura 13: gráfico do calor armazenado no solo em função da velocidade de escoamento do ar (fonte: LOMBARDI, 2005).....	33

Figura 14: gráfico do calor armazenado no solo em função da distancia entre centros dos dutos (fonte: LOMBARDI, 2005)	35
Figura 15: gráficos do distanciamento ideal entre os dutos para a situação de pré-aquecimento (esquerda) e pré-refrigeração (direita) e da temperatura mínima, máxima e interna (fonte: HOLLMULLER, 2004)	35
Figura 16: Esquema de circulação natural do ar no interior do laboratório de energia solar da UFRGS durante o verão (fonte: FIGUEIRA, 2005).....	39
Figura 17: corte esquemático de funcionamento do sistema de dutos enterrados (esquerda) e gráfico de temperatura interna (direita) (fonte: HOLLMULLER; LACHAL, 2004)	41
Figura 18: croquis explicativos das distribuições de pressões em uma caixa cúbica de aresta “a” (fonte: FROTA; SCHIFFER, 1988)	50
Figura 19: exemplo da distribuição da pressão na ventilação por ação dos ventos (fonte: FROTA; SCHIFFER, 1988).....	52
Figura 20: mapa de localização do Vila Ventura (fonte: VILA VENTURA, 200-)	55
Figura 21: foto externa da fachada norte do Protótipo Ventura	61
Figura 22: implantação do Protótipo Ventura	62
Figura 23: planta baixa, fachada norte e corte AA do Protótipo Ventura.....	63
Figura 24: fotos da construção do protótipo (em ordem: construção das paredes, tubos enterrados, estrutura da cobertura, assoalho da cobertura, estrutura da chaminé solar e fechamento da cobertura).....	64
Figura 25: composição de cada conjunto de tubos enterrados; é demonstrado os tubos superiores, mas as dimensões se aplicam também aos tubos inferiores	66
Figura 26: fotos da montagem e forma final da chaminé solar	67
Figura 27: esquema do sentido do fluxo de ar esperado pela atuação da temperatura no verão	68

Figura 28: foto do equipamento de medição usado, linha BABUC/A® (fonte: LSI, 200-)	73
Figura 29: foto do psicrômetro (fonte: LSI, 200-).....	75
Figura 30: foto do termômetro de globo (fonte: LSI, 200-).....	76
Figura 31: foto do anemômetro de fio quente (fonte: LSI, 200-).....	77
Figura 32: foto da controladora TC 900 clock e dos sensores de temperatura encapsulados (fonte: Fullgauge Controles, 2006).....	79
Figura 33: fotos da calibração dos sensores NTC de medição de temperatura.....	80
Figura 34: gráfico demonstrando a variação dos resultados com o aumento da temperatura..	80
Figura 35: foto da controladora MT-530 e dos sensores de temperatura encasulados (fonte: Fullgauge Controles, 2006).....	81
Figura 36: foto da tela da rotina criada no software HP-VEE Pro 6.01 da Agilent Technologies®.....	83
Figura 37: foto do anemômetro de copos KW-820	84
Figura 38: fotos do conserto, calibração e instalação dos anemômetros de copos utilizados..	85
Figura 39: curva de calibração dos anemômetros de copos utilizados	85
Figura 40: foto da biruta eletrônica construída e utilizada nas medições	86
Figura 41: foto do Solarímetro utilizado.....	87
Figura 42: curva de calibração do solarímetro	88
Figura 43: foto do termômetro de globo analógico utilizado.....	89
Figura 44: esquema com a posição dos sensores durante o estudo do comportamento higrotérmico dos ambientes.....	92
Figura 45: esquema com a posição dos sensores durante a observação das grandezas físicas influentes na circulação de ar no interior dos dutos	95

Figura 46: fotos da instalação dos sensores de temperatura e umidade relativa e de temperatura do solo.....	96
Figura 47: fotos dos sensores de radiação solar global, velocidade e direção do vento externo instalados.....	96
Figura 48: foto dos equipamentos instalados nas das salas estudadas.....	98
Figura 49: gráfico da radiação solar global média mensal junto ao Protótipo Ventura e ao 8º Distrito de Meteorologia (2005-2006).....	103
Figura 50: gráfico da velocidade do vento média mensal junto ao Protótipo Ventura e ao 8º Distrito de Meteorologia (2005-2006).....	104
Figura 51: gráfico da direção dos ventos mensal junto ao Protótipo Ventura (2005-2006) ..	105
Figura 52: gráfico da temperatura do ar média mensal junto ao Protótipo Ventura e ao 8º Distrito de Meteorologia (2005-2006).....	106
Figura 53: gráfico da umidade relativa do ar média mensal junto ao Protótipo Ventura e ao 8º Distrito de Meteorologia (2005-2006).....	107
Figura 54: gráfico da temperatura do ar e do solo média (esquerda) e amplitude máxima (direita) registrada junto ao Protótipo Ventura (2005-2006).	109
Figura 55: gráfico de temperatura do ar e do solo (a diversas profundidades) e precipitação no período (2005-2006).....	110
Figura 56: gráfico da radiação solar total (global) e velocidade do vento a 10 metros de altura	111
Figura 57: gráfico da temperatura do ar externa e interna	112
Figura 58: gráfico da umidade absoluta do ar interna.....	113
Figura 59: fotos do Protótipo Ventura tiradas a cada hora do dia 30 de outubro de 2005.....	114
Figura 60: gráfico da radiação solar total (global) e velocidade do vento a 10 metros de altura	115

Figura 61: gráfico da temperatura do ar (esquerda) e umidade absoluta do ar (direita), externo e interno.....	116
Figura 62: gráfico da velocidade do ar no interior do tubo (obs.: valores negativos de velocidade do ar indicam sentido do fluxo saindo da edificação através dos dutos)	117
Figura 63: gráfico da diferença de temperatura entre as extremidades interna e externa dos tubos e superior e inferior da chaminé solar	118
Figura 64: gráfico da radiação solar total (global) e velocidade do vento a 10 metros e 0,5 metros.....	120
Figura 65: gráfico da de temperatura do ar externa e interna.....	121
Figura 66: gráfico da umidade absoluta do ar externa e interna.....	122
Figura 67: gráfico demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro dos tubos com a velocidade do vento externo a 10m (à esquerda) e a 0,5m de altura (à direita).....	123
Figura 68: gráficos demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro dos tubos com a velocidade do vento a 10m (à esquerda) e a 0,5m de altura (à direita), excluindo períodos de calmaria	124
Figura 69: gráfico demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro do tubo com a velocidade do vento a 10m para diferentes diâmetros (à esquerda) e diferentes situações da chaminé (à direita), excluindo situações de calmaria	126
Figura 70: gráfico demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro do tubo e a diferenças de temperatura entre as extremidades inferior e superior dos tubos (à esquerda) do ambiente (ao centro) e da chaminé solar (à direita).....	127
Figura 71: gráfico demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro dos tubos inferiores e a diferenças de temperatura para cada configuração do sistema	128
Figura 72: gráfico demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro dos tubos superiores e a diferenças de temperatura para cada configuração do sistema	129

Figura 73: Gráfico do sentido do deslocamento de ar para cada conjunto de tubos (obs.: registros negativos indicam ar saindo da edificação pelos tubos).....	130
Figura 74: gráfico da radiação solar total (global).....	134
Figura 75: gráfico da velocidade do ar no interior dos tubos, velocidade do vento a 10 metros e a 0,5 metros de altura	134
Figura 76: gráfico da temperatura do ar interno e externo.....	135
Figura 77: gráfico de temperatura do ar externo e interno médio a cada semana.....	137
Figura 78: histograma de temperatura do ar externo e interno na sala A e na Sala B.....	139
Figura 79: gráfico da umidade relativa do ar externa e interna na sala A e na Sala B	139
Figura 80: gráfico da umidade absoluta do ar externa e interna na sala A e na Sala B.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: índices de renovação de ar por pessoa para cada tipo de ambiente (fonte: NB-10 da ABNT)	45
Tabela 2: produção de dióxido de carbono e de vapor de água na combustão (fonte: LNEC, 1994)	46
Tabela 3: liberação de calor e produção de dióxido de carbono e de vapor de água no metabolismo humano (LNEC, 1994).....	46
Tabela 4: efeito da velocidade do vento sobre o usuário e influência na sensação térmica (fonte: EVANS; SCHILLER, 1994).....	49
Tabela 5: determinação do incremento de vazão causado pela razão das áreas de abertura (fonte: Frota e Schiffer, 1988).....	53
Tabela 6: dimensões e áreas das esquadrias do protótipo.....	65
Tabela 7: variáveis da pesquisa	71
Tabela 8: valores de temperatura do ar registrados pela sonda BABUC/A® e os sensores do MT-530 PLUS	82
Tabela 9: valores de umidade relativa do ar registrados pela sonda BABUC/A® e os sensores do MT-530 PLUS	82
Tabela 10: valores de temperatura média radiante registrados pela sonda BABUC/A® e o termômetro de globo analógico	89
Tabela 11: dados coletados durante o estudo do comportamento higrotérmico dos ambientes	93
Tabela 12: diferença de temperatura média entre as salas e grau de correlação de Pearson .	112
Tabela 13: diferença de temperatura do ar nas extremidades dos tubos interna e externa em graus Celsius.....	136
Tabela 14: somatório de graus-hora para refrigeração	138

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA	3
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	4
1.3 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	5
1.4 HIPÓTESES	6
1.5 DELINEAMENTO	6
2 O USO DO CALOR DO SOLO PARA O CONDICIONAMENTO TÉRMICO DE AMBIENTES CONSTRUÍDOS	9
2.1 BREVE HISTÓRICO	10
2.2 O USO DO POTENCIAL CALORÍFICO DO SOLO PARA CONDICIONAMENTO TÉRMICO DE AMBIENTES CONSTRUÍDOS	12
2.2.1 Contato Direto.....	14
2.2.2 Contato Indireto	15
2.2.2.1 Bombas de Calor	17
2.2.2.2 Dutos Enterrados.....	20
2.2.2.3 Ventilação Natural através do Subsolo.....	21
2.3 INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA NA EFICIÊNCIA DAS TROCAS DE CALOR COM O SOLO.....	22
2.3.1 Modelos Matemáticos	22
2.3.2 Variáveis do Sistema.....	25
2.3.2.1 O Clima.....	25
2.3.2.2 O Solo.....	26
2.3.2.3 Os Dutos	31
2.4 ESTUDOS DE CASO OU EXPERIMENTOS	36
2.4.1 Complexo de Seis Casas localizadas na Vila Costozza, Itália.....	36
2.4.2 Escola em La Pampa, Argentina.....	37
2.4.3 Laboratório de Energia Solar da UFRGS.....	38

2.4.4 Estufas para Vegetais	39
2.4.5 Prédio Caroubier em Genebra, Suíça	40
3 VENTILAÇÃO NATURAL DE HABITAÇÕES	42
3.1 FINALIDADES DA VENTILAÇÃO	43
3.1.1 Ventilação Higiênicas, Mínima ou de Inverno	44
3.1.2 Ventilação Térmica ou de Verão	47
3.1.3 O Efeito da Ventilação no Conforto Térmico.....	48
3.2 TIPOS DE VENTILAÇÃO	49
3.2.1 Ventilação por Diferença de Densidade ou Efeito Chaminé	50
3.2.2 Ventilação pela Ação dos Ventos	52
4 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO VENTURA, DA SUA ENVOLTÓRIA E DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE TUBOS ENTERRADOS	55
4.1 BREVE CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DO ESTADO E DA CIDADE DE VIAMÃO	56
4.2 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO VENTURA.....	60
4.2.1 Características dos materiais empregados	64
4.2.2 Descrição dos Sistemas de Dutos Enterrados e da Chaminé Solar.....	66
4.2.2.1 Funcionamento do Sistema no Verão durante o Dia e a Noite.....	67
5 ABORDAGEM EXPERIMENTAL	70
5.1 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DO MÉTODO DE PESQUISA	70
5.2 INSTRUMENTAÇÃO.....	72
5.2.1 Laboratori di Strumentazione Industriale®	72
5.2.1.1 Psicômetro	74
5.2.1.2 Termômetro de Globo ou Globo de Vernon digital	76
5.2.1.3 Anemômetro de fio quente	77
5.2.2 Full Gauge Eletro Controles Ltda®	78
5.2.2.1 TC-900 CLOCK®.....	78
5.2.2.2 MT-530 PLUS®.....	81

5.2.3 Sondas independentes.....	82
5.2.3.1 Anemômetro de copos fabricado no LETA.....	83
5.2.3.2 Anemômetro de copos KW-820	83
5.2.3.3 Biruta Eletrônica	86
5.2.3.4 Solarímetro.....	86
5.2.3.5 Termômetro de Globo Analógico ou Globo de Vernon Analógico	88
5.3 MONTAGEM EXPERIMENTAL	90
5.3.1 Estudo Piloto.....	90
5.3.2 Descrição da Montagem Experimental	91
5.3.2.1 Comparação do Comportamento Higrotérmico dos Ambientes.....	91
5.3.2.2 Observação dos fatores influentes na circulação de ar no interior dos dutos enterrados	94
5.3.2.3 Observação do Desempenho Higrotérmico na Sala Ventilada pelo Sistema de Tubos.....	98
5.3.3 Tratamento dos dados.....	99
5.3.4 Constatações sobre o andamento da pesquisa, o método adotado e os equipamentos utilizados	99
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	102
6.1 DADOS EXTERNOS MÉDIOS MEDIDOS NO PERÍODO ESTUDADO	102
6.1.1 Radiação solar global (total).....	102
6.1.2 Velocidade e direção do vento.....	103
6.1.3 Temperatura do ar	106
6.1.4 Umidade relativa do ar	107
6.1.5 Temperatura do Solo	108
6.2 COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DOS AMBIENTES.....	111
6.2.1.1 Primeiras Observações sobre o Funcionamento Geral do Sistema de Ventilação Natural por Tubos Enterrados	115
6.3 OBSERVAÇÃO DOS FATORES INFLUENTES NA CIRCULAÇÃO DE AR NO INTERIOR DOS DUTOS.....	119
6.3.1 Dados Climáticos do Período	120
6.3.2 Observação da Influência das Grandezas Físicas no Deslocamento de Ar no Interior dos Tubos enterrados.....	123

6.4 OBSERVAÇÃO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO.....	132
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	142
7.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO ADOTADO	142
7.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O COMPORTAMENTO DO SISTEMA.....	143
7.2.1 Fatores Influentes na Circulação de Ar dentro dos Tubos	143
7.2.2 O Desempenho Higrotérmico	146
7.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O APRIMORAMENTO DO SISTEMA E SOBRE A INTERVENÇÃO DO USUÁRIO	148
7.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:.....	149

1 INTRODUÇÃO

O consumo anual de energia elétrica no Brasil vem aumentando paulatinamente. Diferente do senso comum – que o relaciona ao crescimento da produção industrial – esse aumento se mostra mais acentuado justamente nos setores residencial e comercial. Dentre os possíveis fatores geradores de tal aumento é possível destacar: o modelo consumista em voga que se traduz, entre outros, em uma maior aquisição de eletrodomésticos em geral de pouca eficiência energética; um modelo de arquitetura inabitável sem o uso de climatização e iluminação artificial; e um urbanismo que constrói cidades baseadas em interesses imobiliários, deixando de lado aspectos como salubridade e economia.

Como decorrência desse processo, aliado à falta de investimentos em geração de energia (hídrica e, principalmente, alternativa) e ao longo período de estiagem, o país passou recentemente por uma forte crise energética que atingiu principalmente os grandes centros urbanos que ficaram sob ameaça de “apagões” e ainda enfrentam consecutivos aumentos de tarifas em energia elétrica e combustíveis.

Esta problemática não é restrita ao Brasil ou a países em desenvolvimento. Muitos países desenvolvidos apresentam um consumo de energia (elétrica ou de qualquer outra natureza) muito mais acentuado por habitante, principalmente pelo alto padrão de conforto exigido, e por isso também já enfrentam racionamento energético.

Além da questão econômico-energética, que demanda grandes investimentos do Estado em geração e distribuição, é necessário considerar o fator ambiental envolvido. Diferente do Brasil, que possui a maior parte da geração de energia elétrica livre de emissão de poluentes através das hidrelétricas, outros países têm de recorrer à queima de combustíveis fósseis ou a reações nucleares para atender sua demanda crescente, resultando em uma grande quantidade de resíduos sólidos, gasosos e radioativos liberados para o ambiente.

Desse modo, demonstra-se pertinente pesquisar e desenvolver sistemas alternativos, de baixo consumo de energia para operação, principalmente de condicionamento térmico, uma vez que esse tipo de equipamento é um dos principais responsáveis pelos picos de energia anual em países tropicais. Além do mais, com a evolução das envoltórias da edificação, passaram a ser

requeridos sistemas de renovação de ar internos, principalmente os que possibilitem o pré-aquecimento no inverno e o pré-resfriamento no verão.

A criação do Protótipo Ventura teve início na busca do empresário Samuel da Silveira, do Grupo SAMPAR, de construções e sistemas construtivos de menor impacto ambiental para sua Unidade de Negócios Vila Ventura (de onde surgiu o nome). O empreendimento está localizado no município de Viamão, cidade integrante da Grande Porto Alegre no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

Aliada a esta necessidade, no NORIE (Núcleo Orientado pela Inovação da Edificação), pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, era ministrada a disciplina de “Edificações e Comunidades Sustentáveis 1” pelo Prof. PhD. Miguel Sattler. O objetivo era de desenvolver edificações que apresentassem arquitetura bioclimática e que fizessem uso de materiais de baixo impacto ambiental durante a produção, o transporte, a construção, a utilização e a demolição, bem como de apresentar sistemas alternativos e mais sustentáveis para a utilização de recursos naturais.

Desta maneira, foi estabelecido um vínculo de caráter público-privado. O empresário se comprometeu na construção do protótipo (que futuramente seria utilizado como uma pequena escola de artesanato) e a manteria desocupada pelo período de dois anos. Em contraponto, a Universidade, representada pelo grupo de alunos do NORIE, se encarregaria do projeto arquitetônico e estrutural, do acompanhamento das obras, da instalação de monitoramento de diversos sistemas mais sustentáveis para diversos fins e da transmissão do conhecimento gerado para a comunidade acadêmica, para o empresário e para a sociedade.

Entre os sistemas empregados – e pertinentes com a problemática acima mencionada – encontra-se o denominado “ventilação pelo subsolo”. Ele consiste em captar o ar exterior e transmiti-lo ao interior da edificação através de um ou mais feixes de tubos enterrados sem utilizar elementos mecânicos para tal circulação. Uma vez que o solo apresenta uma variação térmica – ao longo do dia e do ano – menor que a do ar, o contato do ar com as paredes do tubo, e conseqüente troca de calor com o solo, permitiria ser pré-aquecido na situação de inverno ou à noite e pré-refrigerado na situação de verão ou durante o dia.

1.1 JUSTIFICATIVA

Embora o sistema de ventilação natural pelo subsolo já seja utilizado em edificações e seus princípios sejam difundidos pela arquitetura sustentável, poucos estudos discorrem sobre sua influência no desempenho térmico e não são do conhecimento do autor estudos que descrevam as variáveis influentes no deslocamento do ar no sistema.

A ventilação mecânica por dutos enterrados, como citado por diversos autores, apresenta inúmeros benefícios como melhorar o condicionamento térmico, e, através da renovação do ar, promover sua higiene e reduzir sua quantidade de umidade. Além disso, indiretamente, ela é capaz de promover o conforto acústico e o controle de insetos de ambientes construídos uma vez que estamos fechando as esquadrias (BOJIÉ et alli, 1997; FISK; TURRIEL, 1982; HAZER, 1975; HOLLMULLER; LACHAL, 2001 e 2003; JACOVIDES et alli, 1996; MIHALAKAKOU et alli, 1996; SANTAMOURIS, 1995, 1996). É bem possível que, a ventilação natural pelo subsolo, possa promover os mesmos benefícios.

Além do mais, existe uma quantidade considerável de estudos sobre o sistema ventilação por tubos enterrados com atuação mecânica. Hazer (1975) cita inúmeras edificações que utilizam o sistema. Fisk e Turiel (1995) descrevem formas e alternativas de configuração. Tzaferis (1992) descreve e compara oito algoritmos que simulam com uma boa precisão o comportamento térmico do sistema. A influência do clima foi descrita por Tselpidaki et alli (1993), Santamouris et alli (1996) e Hollmuller (2004) e é notória pela sua grande influência no desempenho do sistema. O comportamento térmico do solo de diferentes propriedades já foi estudado e é bem conhecido (JACOVIDES et alli, 1996, SANTAMOURIS et alli, 1996, KURUPASKA et alli, 2004, HOLLMULLER, 2004, BOJIÉ et alli, 1997). A influência de diferentes coberturas do solo também já foi descrita e comparada por Mihalakakou et alli (1996). A configuração do sistema de tubos, também já é bem conhecida, determinando a influência do diâmetro dos tubos (SANTAMOURIS, 1996 e LOMBARDI, 2005), de seu comprimento (KABASHNIKOV et alli, 2002 e GAUTHIER et alli, 1997), da velocidade do ar dentro dos tubos (HOLLMULLER e LACHAL, 2001) e do distanciamento entre os tubos (LOMBARDI, 2005 e HOLLMULLER, 2004).

Estes inúmeros estudos, através de adaptações, podem representar rápidos avanços no sistema de ventilação natural pelo subsolo. E eles, além de representar a base teórica para o estudo em

questão, denotam que avanços nessa nova área serão de grande valia do ponto de vista energéticos.

O trabalho mais próximo encontrado, com o mesmo tema, foi desenvolvido por Larsen et alli (2003) em La Pampa, Argentina. Ele demonstra uma possibilidade de uso do sistema para climas subtropicais, mas não aprofunda sobre o dimensionamento do sistema ou sobre as variáveis influentes no deslocamento de ar dentro dos tubos.

Da mesma forma que a Argentina, o estado do Rio Grande do Sul possui condições climáticas e de solo favoráveis para o uso do solo como armazenador térmico como descrito por Vaz e Sattler (2004), entre outros fatores, por apresentar grande amplitude térmica diária e sazonal da temperatura do ar e características do solo propícias, indicadas pelos autores.

Outra justificativa importante é que uma vez estudado o sistema atuante em uma edificação, passa a ser possível o estudo dos agentes atuantes separadamente a fim de aperfeiçoar o sistema os quais servirão de base para validações matemáticas.

Além do mais, Lengen (2004) coloca que, por não necessitar de fontes energéticas, possuir uma fácil instalação e ser adaptável a praticamente qualquer terreno, espera-se que o sistema pode ser facilmente assimilado por classes menos favorecidas.

O momento do estudo também se mostrou propício, pois havia um investidor interessado no sistema que se propôs a montar o protótipo experimental em sua propriedade, bem como ajudou o custeio da estadia do pesquisador e pretende, caso os resultados sejam positivos, instalar o sistema em outras edificações.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

A pesquisa possui dois objetivos de igual importância. Ambos são baseados na avaliação através de monitoramento do sistema de ventilação natural por dutos enterrados, instalado no Protótipo Ventura. O primeiro objetivo consiste em detectar as grandezas físicas significativas na circulação de ar dentro dos tubos do sistema instalado no Protótipo Ventura. Desse, derivam-se os seguintes objetivos secundários:

- a) a estimativa da faixa de influência de cada elemento para o sistema instalado no protótipo em questão;
- b) a observação dentre os elementos estudados, dos mais significativos no sentido do deslocamento de ar no interior dos tubos (de dentro para fora, ou, de fora para dentro);
- c) a observação da influência dos 2 diâmetros, das 2 orientações e das 2 inclinações dos tubos enterrados instalados, bem como da chaminé solar (aberta e fechada), na velocidade do deslocamento de ar no interior do sistema instalado.

O segundo objetivo constitui-se em avaliar o desempenho higrotérmico da sala na qual está instalado o sistema de ventilação natural pelo subsolo instalado no Protótipo Ventura. Desse objetivo, derivam-se os seguintes objetivos secundários:

- a) a comparação da temperatura e da umidade do ar da sala ventilada pelo sistema com uma sala de referência e com o meio externo;
- b) a observação e comparação do retardo térmico nos dois ambientes internos;
- c) a observação da temperatura do ar no interior dos tubos e sua relação com as condições de temperatura no interior da sala e no retardo térmico;
- d) a observação da velocidade máxima atingida na boca interna do tubo de modo a não prejudicar o conforto do usuário;

1.3 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Por se tratar de um monitoramento de edificação, os resultados obtidos neste trabalho se limitam ao período de 21 de outubro de 2005 a 11 de março de 2006 e são válidos apenas para o sistema instalado no Protótipo Ventura.

Não é do foco deste trabalho analisar isoladamente cada uma das variáveis influentes no deslocamento de ar dentro do sistema. Essa definição surge, pois se pretende observar os elemen-

tos significativos que geram a circulação de ar dentro dos tubos do sistema de maneira mais abrangente, estipulando faixas de atuação para o sistema instalado.

O estudo se caracteriza, também, como monitoramento de/em edificação com características rústicas e artesanais, na qual fatores climáticos externos têm grande influência nos resultados, devido principalmente à existência de frestas. A este fato é adicionada a não-intenção de avaliar as variáveis independentemente, as quais geram uma grande interferência (ou dispersão) nos resultados, de modo que se optou por desenvolver um estudo qualitativo e não quantitativo, não sendo do escopo deste trabalho buscar uma explicação numérica dos resultados obtidos.

1.4 HIPÓTESES

O trabalho apresentado possui as seguintes hipóteses:

- a) dentre as grandezas físicas estudadas, a diferença de temperatura do ar gerada no interior da chaminé é a predominante no deslocamento de ar no sistema;
- b) o deslocamento do ar no interior dos tubos, devido às trocas térmicas, é descendente durante o dia, pois o ar externo, que neste turno está mais quente que o solo, será refrigerado. O oposto irá ocorrer durante a noite;
- c) o retardo térmico da sala ventilada é menor que o da sala testemunho;
- d) os tubos atuam como atenuantes da temperatura do ar externo que penetra na sala, causando um pré-aquecimento à noite e um pré-resfriamento durante o dia.

1.5 DELINEAMENTO

Durante o desenvolvimento da disciplina de Edificações e Comunidades Sustentáveis 1, a revisão da literatura determinou as características da construção coerentes com uma arquitetura energeticamente eficiente e sustentável, bem como as técnicas construtivas a serem empre-

gadas (com vista em estudos futuros) e a melhor configuração dos espaços para o monitoramento de tais sistemas. A descrição física do protótipo, bem como dos materiais empregados encontra-se no capítulo 4.

Um estudo mais aprofundado e mais específico da bibliografia, descrito nos capítulos 2 e 3, foi realizado para a execução do pré-dimensionamento do sistema de tubos. O delineamento da pesquisa pode ser visto na figura 1.

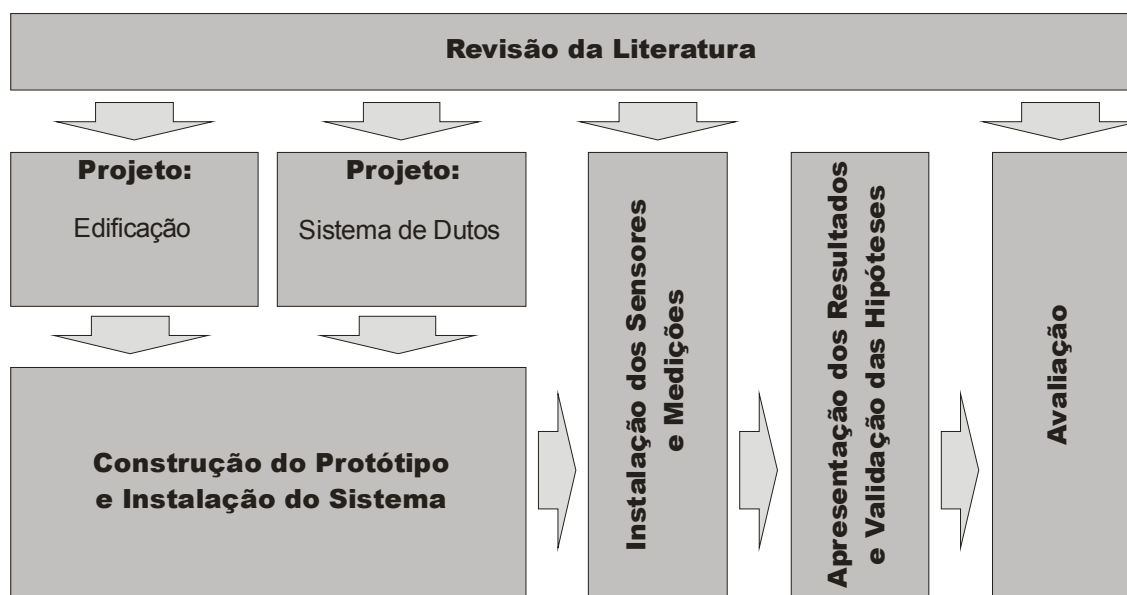


Figura 1: delineamento da pesquisa

Uma vez tendo os projetos definidos, foi executada a construção do protótipo, que se estendeu até o dia 20 de outubro de 2005. Concomitantemente com a obra, foram determinados os tipos de sensores necessários (baseados nas suas faixas de abrangência e precisão), bem como se executou a calibração dos instrumentos. Nesse período também ocorreu o estudo piloto. Os equipamentos utilizados, suas características e seu processo de calibração são descritos no capítulo 5.

Uma terceira busca no referencial teórico ocorreu para determinar a melhor posição e configuração dos equipamentos para uma correta leitura dos dados, sendo, inclusive, discutidos com profissionais atuantes na área de experimentação os melhores meios para o registro de valores sem interferências. Sendo assim, no momento em que a edificação apresentou as característi-

cas mínimas para ser monitorada (as medições ocorreram sem o protótipo apresentar revestimentos de piso e parede) os sensores foram instalados, do modo descrito no capítulo 5.

Após a coleta dos dados, eles foram tratados estatisticamente e expostos a fim de validar ou não as hipóteses iniciais do trabalho. O cruzamento dessas informações coletadas com a bibliografia permitiu a tomada de conclusões e a avaliação do sistema do ponto de vista do desempenho higrotérmico.

2 O USO DO CALOR DO SOLO PARA O CONDICIONAMENTO TÉRMICO DE AMBIENTES CONSTRUÍDOS

Neste capítulo, serão abordados os temas sobre o uso do potencial calorífico do solo, dando ênfase aos relacionados ao condicionamento térmico de ambientes construídos.

Segundo a raiz etimológica, energia geotérmica é a energia em forma de calor armazenada na crosta terrestre, que está contida nas rochas, cascalhos, areias e fluídos (água e ar) que preenchem seus poros e fraturas (VAZ; SATTLER, 2004). Poderíamos, então, descrever o trabalho em questão como pertencente a tal grupo, pois geotermia seria o conjunto de ciências e técnicas que estuda e explora este calor.

Entretanto, o estudo bibliográfico revela que o termo “geotermia” é mais aplicado na prática da geologia (na localização de jazidas naturais de fontes quentes no solo, principalmente água, a temperaturas entre 90°C e 180°C) e da engenharia eletromecânica (na geração de energia elétrica, na calefação, ou em processos industriais de secagem), como descrito por Pesce (2003).

Para sistemas com temperaturas inferiores às mencionadas (inferiores a 90°C), os recursos geotérmicos apresentam uma grande variedade de atividades agrupadas sob o nome genérico de “usos diretos” ou de “sistemas de baixa entalpia”. Entre eles, pode-se mencionar a calefação de ambientes, o processamento de alimentos, a lavagem e a secagem de lã, a fermentação, a indústria papelreira, a produção de ácido sulfúrico, a manufatura de cimento, etc. (PESCE, 2003).

Embora incluídas no grupo anterior, os estudos do calor da terra em temperaturas ordinárias têm seu principal foco em processos mecânicos de transferência de calor e massa com o solo. Esses estudos são recentes e procuram aproveitar a grande inércia térmica da crosta terrestre como um “reservatório” de energia calorífica, de onde é possível retirar ou armazenar calor (HOLLMULER; LACHAL, 2001). A esse terceiro grupo é atribuída a ventilação natural pelo subsolo, tema deste trabalho, para o qual será dirigido este capítulo.

2.1 BREVE HISTÓRICO

O uso da energia geotérmica remonta aos primeiros povos, principalmente nas regiões onde o calor telúrico aflora à superfície ou em regiões de clima severo. Seu uso contempla propósitos de recreação, de terapia e de adaptação ao meio (PESCE, 2003).

Os etruscos, há 3500 anos atrás, utilizavam a água aquecida naturalmente para a higiene pessoal e os colonos escandinavos, na Islândia, a levavam desde as fontes até suas vivendas, através de dutos de madeira (PESCE, 2003). Oliveira (200-) aponta que os romanos, em Pompéia, construía edificações diferentes das da época, pois eram dotadas de boa orientação solar e eólica e incluíam o uso racional de iluminação e aproveitamento do vapor geotérmico para o aquecimento dos ambientes, a higiene pessoal, o tratamento de doenças e o lazer.

O exemplo de uso do solo como armazenador térmico de data mais remota é apresentado pelos Vikings, na Escandinávia, que construía suas casas parcial ou totalmente enterradas, usando muita madeira e com telhado recoberto de turfa, de modo a manter os ambientes mais aquecidos (FIGUEIREDO, 200-). Essa técnica foi usada em diferentes tempos da história e em diferentes partes do mundo. Importantes habitações subterrâneas em vilas e comunidades desenvolveram-se na região do Mediterrâneo (MIHALAKAKOU et alli, 1992) e suas aplicações no período moderno foram descritas por inúmeros autores, como colocam Jacovides et alli (1996).

Na América, os Maias desfrutavam de recursos de calor terrestre na arquitetura, na agricultura e na higiene pessoal. São dessa época os fundamentos da tradição mexicana do ritual Temazcalli (Temaz = vapor, calli = casa) que busca a cura, a limpeza e a purificação do corpo e do espírito através de banhos com vapor termal (VAZ; SATTTLER 2004).

Alguns séculos depois surgiram os *spas* geotérmicos na Bélgica (1326). Esses centros eram dedicados à recuperação física e mental, a partir do relaxamento obtido por banhos quentes aproveitando o calor de fontes térmicas minerais. Os *resorts* americanos e os banhos sociais japoneses são mais recentes. Em 1852 houve a inauguração do centro Calistoga, na Califórnia (VAZ; SATTTLER 2004). Os fluidos geotérmicos eram usados também como calefação de cidades, como em Budapeste (Hungria), em algumas zonas de Paris, em cidades islandesas e em várias regiões dos Estados Unidos (PESCE, 2003).

Na Idade Moderna, se inicia o uso de vapores provenientes de fontes termais para a produção de produtos químicos, derivados do ácido bórico na região de Larderello (Itália), hoje conhecida como Boraciferous (VAZ; SATTLER, 2004). Com o tempo, o processo se desenvolveu e as fontes passaram a ser aproveitadas na geração de energia elétrica a partir de 1904, onde a produção continua até a atualidade (PESCE, 2003). Em 1913, a eletricidade era vendida e aquecia poucas residências. Porém, em 1943, a geração geotérmica de eletricidade na Itália era responsável pelo aquecimento de mais de 130.000 residências e produzia cerca de 130MW de potência (VAZ; SATTLER, 2004).

O século XX foi marcante para a humanidade, não apenas pelos conflitos mundiais, mas também pelos impressionantes avanços tecnológicos. Vaz e Sattler (2004) colocam que a grande oferta de combustíveis fósseis e o baixo entendimento dos resultados prejudiciais ao meio ambiente, quando usados indiscriminadamente, tornaram inviável o desenvolvimento de qualquer outra fonte energética. Até a década de 60, quando o petróleo dava os primeiros sinais de crise, a tecnologia da energia geotérmica ficou estagnada e restrita aos locais tradicionais de uso. Após os choques políticos e econômicos gerados, a crise mostrou a fragilidade do sistema econômico-energético vigente. Essa visão, aliada ao desenvolvimento de uma consciência de proteção ao meio ambiente, criou o campo necessário para que as tecnologias limpas voltassem a ser atrativas.

Hoje, o vapor produzido por líquidos quentes naturais em sistemas geotérmicos é uma alternativa às plantas de energia por queima de combustível fóssil, por fissão nuclear e por outros meios. As perfurações modernas alcançam reservas de água e vapor aquecidos por magma, até uma profundidade de 3.000m abaixo do nível do mar. Sistemas novos estão sendo desenvolvidos, buscando furar rochas secas e quentes, situadas abaixo de vulcões inativos, para nessas fissuras, forçar a circulação de água superficial, a qual regressará como vapor que poderá ser usado na geração de energia (PESCE, 2003).

No campo da construção, retomou-se o desenvolvimento de técnicas para explorar o calor do solo a baixas temperaturas e seu uso como aquecedor ou refrigerador da edificação tem tido um crescente interesse durante as últimas quatro décadas (JACOVIDES et alli, 1996). Hazer (1975) coloca que duas estratégias são definidas: o contato direto com a terra que envolve parte, ou totalmente, a edificação e o contato indireto, que envolve o uso de tubos enterrados,

por onde o ar interior ou exterior da edificação circula antes de ser trazido para dentro da edificação.

O uso de trocadores de calor terra-ar, na arquitetura moderna, para aquecimento ou refrigeração de espaços, tem sido reportado freqüentemente durante as últimas décadas. Sistemas de tubos enterrados, que garantem 100% do resfriamento da edificação, foram descritos por diversos pesquisadores na década de 90 (JACOVIDES et alli, 1996).

2.2 O USO DO POTENCIAL CALORÍFICO DO SOLO PARA CONDICIONAMENTO TÉRMICO DE AMBIENTES CONSTRUÍDOS

Existem três fontes naturais de calor que influem no aquecimento do solo: zonas de afloramento do magma do núcleo terrestre, desintegração de elementos radioativos – tais como potássio, urânio e tório (existentes na plataforma continental) – e a radiação solar (PESCE, 2003). Dentre elas, a radiação solar é a fundamental para a vida no planeta por atuar em toda a superfície terrestre, enquanto as demais atuam na crosta apenas em zonas anômalas. Desta forma, muito pouco do aquecimento terrestre ocorre por fonte diferente do calor absorvido diretamente da radiação solar pelo solo, o qual é re-emitido para a atmosfera (GRIMM, 200-).

Como os gases atmosféricos são bastante transparentes à radiação solar (ondas curtas) e mais absorvente para radiação terrestre (ondas longas), a Terra é a maior fonte de calor do ar. A atmosfera, portanto, é aquecida a partir da superfície terrestre, ocorrendo um decréscimo de aproximadamente 6,5°C para cada quilometro de altitude. Quando a atmosfera absorve radiação terrestre, ela se aquece e eventualmente irradia esta energia, para cima e para baixo, onde é novamente absorvida pela Terra. Portanto, a superfície da Terra é continuamente suprida com radiação da atmosfera e do sol. Esta energia será novamente emitida pela superfície da Terra e uma parte retornará à atmosfera que, por sua vez, re-irradiará uma parte para a Terra e assim por diante. Esse processo entre a superfície da Terra e a atmosfera torna a temperatura média da Terra aproximadamente 35°C mais alta do que seria sem os gases absorvedores da nossa atmosfera, tornando o planeta habitável (GRIMM, 200-).

A parte absorvida pelo solo aquece também as suas camadas superficiais por condução. Excluindo as zonas de afloramento de calor, as camadas entre 0,1m a 1,0m de profundidade (de

acordo com a sua difusidade térmica) sofrem variação diária de temperatura, enquanto as camadas de até 20m sofrem apenas variação no ano, sendo, em ambos os casos, ao redor da média anual. Essa variação é pequena se comparada com a da temperatura do ar nos mesmos períodos, sendo assim, climas com noites frias e dias quentes ou invernos e verões rigorosos são mais propícios ao uso do solo como “reservatório” térmico para o condicionamento de ambientes (HOLLMULLER; LACHAL, 2001). Este é o foco do trabalho devido à maior utilização, à maior disponibilidade, à possibilidade também de resfriamento do ambiente (diferente das demais) e por ser a única disponível no sul do Brasil.

Não foram localizados dados muito precisos sobre a capacidade energética instalada na utilização do potencial calorífico do solo no condicionamento térmico, uma vez que, como descrito anteriormente, os dados estão atribuídos ao nome comum.

Pesce (2003) não faz distinção entre a porcentagem que é utilizada por sistemas de baixas temperatura e os sistemas de inércia térmica do solo, mas coloca que dos 80 países que contam com a possibilidade de explorar comercialmente este recurso, 55 os empregam em uso direto e não na geração de energia elétrica. Em 1999, o potencial instalado era de 16,2 MW. Dessa potência, utilizava-se 37% no aquecimento de ambientes, 22% em águas medicinais, 14% em bombas de calor, 12% em estufas, 7% em aquíferos, 6% em aplicações industriais e 2% em agricultura e outras aplicações.

Entre os citados, os referentes a condicionamento de edificações (calefação, bombas de calor e estufas) totalizam 63% da energia total instalada e, dentro deste grupo, provavelmente estejam incluídos os sistemas inerciais, pois apresentam o mesmo princípio de funcionamento. O mesmo autor coloca que este total demonstra que o uso direto é a forma de calor geotérmico mais difundido atualmente para calefação de ambientes. Os países que se destacam em seu uso são a Islândia, os Estados Unidos e a Nova Zelândia e as principais cidades são Budapeste (Hungria), Reykjavík (Islândia) além de algumas zonas de Paris (França).

Mesmo sendo indiretamente a maior responsável pelo aquecimento atmosférico, por apresentar uma grande inércia térmica, a temperatura do solo varia menos que a do ar durante o ano. Sendo assim, durante o inverno, a temperatura do solo é consideravelmente maior que a dos ambientes e, durante o verão, é menor (SANTAMOURIS et alli, 1996). Esse fenômeno também é observado em variações diárias com o efeito do retardo térmico. À noite, quando a temperatura do ar decresce rapidamente, o solo conserva o calor por mais tempo, perdendo-o

lentamente e, durante o dia, o adquire com menor velocidade (HOLMULLER, 2003). Desta forma, é possível utilizar a massa terrestre como um recurso de resfriamento ou aquecimento natural para uma edificação, tanto de uma maneira passiva como ativa. No verão, a uma profundidade de poucos metros, é possível reduzir a temperatura ambiente, caso utilizemos seu potencial como reservatório de calor (LENGEN, 2004).

O uso do solo como armazenador térmico, retirando o excesso de calor no verão e fornecendo-o no inverno pode ocorrer através dos contatos direto e indireto (HAZER, 1975).

2.2.1 Contato Direto

O uso do solo para condicionamento térmico de edificações por contato direto foi o mais utilizado ao longo da história. As edificações construídas parcial ou totalmente enterradas têm suas variações de temperatura amenizadas por essa troca de calor constante com o solo. Há muitos exemplos, em sua maioria estão localizados em regiões de frio severo ou com grande variação de temperatura ao longo do ano. Entre eles, se destacam as casas de praticamente todos dos povos antigos do norte da Europa, as adegas italianas e os índios da serra do sul do Brasil (descrito respectivamente por OLIVEIRA, 200-; FIGUEIREDO, 200-; JACOVIDES et alli, 1996 e WEIMER, 1992).

Edificações com contato direto com o solo oferecem várias vantagens, como limitadas infiltração e perdas de calor, proteções solar e de calor, reduções do barulho e da vibração, proteções contra o fogo e contra tempestades e grande segurança. Em adição, elas apresentam benefícios ambientais, já que sua manutenção e sua operacionalidade são de custo reduzido. Em contraste, freqüentemente são encontrados problemas de condensação na parte interna de superfícies em contato com o solo, de resposta demorada do ar interno à variação climática e de baixa qualidade desse ar uma vez que nem sempre esses ambientes são adequadamente ventilados (JACOVIDES et alli, 1996).

2.2.2 Contato Indireto

O uso do solo por contato indireto é bastante recente e ainda pouco difundido, apesar de suas inúmeras vantagens (FISK; TURIEL, 1995). O mecanismo para usar o solo dessa maneira é enterrar dutos no solo e fazer circular ar (ou outro fluido) por dentro deles. A troca de calor entre o solo e o fluido através de tubos pode reduzir o consumo energético requerido de uma edificação e é largamente usado para prover ar refrigerado a estufas e outras edificações (SANTAMOURIS; LEFAS, 1986).

Os dutos que percorrem o subsolo podem adquirir diversas configurações que variam com as capacidades do local e com as exigências de uso. Quanto à circulação do fluido, o sistema pode ser aberto ou fechado e, quanto à distribuição dos dutos, horizontal ou vertical. A escolha do sentido da serpentina no solo depende da disponibilidade de espaço. Os trocadores verticais (figura 2) exigem escavações mais profundas, mas podem ser utilizados em terrenos com restrições de espaço e prejudicam menos a cobertura do solo. São geralmente mais caros, porém apresentam melhor rendimento que os tubos horizontais (FISK; TURIEL, 1995).

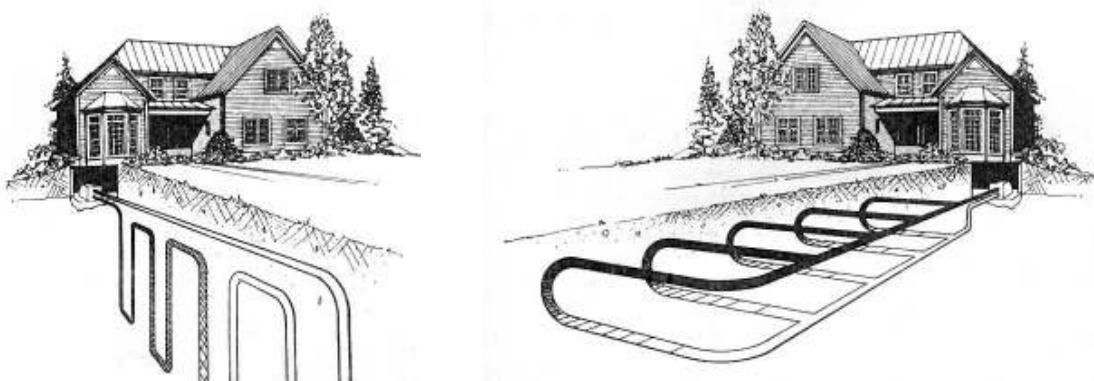


Figura 2: exemplo de tubos verticais (esquerda) de tubos horizontais (direita) (fonte: FISK; TURIEL, 1995)

O sistema horizontal é indicado em locais onde não há restrições de terreno. É o desenho mais popular. Tubos de plástico especial são enterrados em linhas com profundidades entre 1m e 2m. A profundidade depende do clima e do número de tubos em cada linha. Para locais com certa restrição de espaço, pode ser utilizada uma espiral. Para garantir a eficiência do sistema

e impedir vazamentos, deve ser utilizada como tubo uma liga especial de polietileno, com ligação a fusão (FISK; TURIEL, 1982).

No sistema fechado, o fluido utilizado para a transferência de calor circula constantemente pressurizado através dos tubos enquanto o sistema está em operação, trocando calor com o solo, sem ser disperso no exterior ou no interior. Esse sistema permite o uso de fluidos com características térmicas mais propícias e que executam trocas térmicas com mais eficiência com o solo através de dutos plásticos ou de cobre. O fluido pode trocar calor com o ar da central de condicionamento que será conduzido pelo sistema de tubulação, ou ser conduzido diretamente para o local final de uso (FISK; TURIEL, 1995).

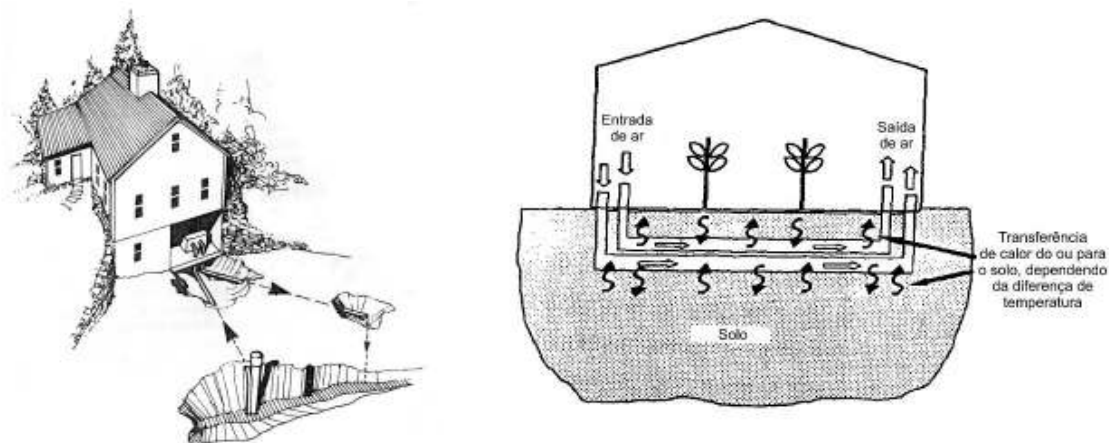


Figura 3: exemplo de sistema aberto com uso de água (esquerda) (fonte: FISK; TURIEL, 1995) e uso de ar (direita) (fonte: SANTAMOURIS et alli, 1995)

No sistema aberto (figura 3), o fluido (ar ou água) é disperso em um ou ambos os meios. Sistemas abertos que utilizam água são recomendados em locais onde haja um poço, uma fonte ou um córrego. O ideal é que a coleta e o descarte não ocorram no mesmo recipiente ou ocorram com o máximo de diferença de altura ou de distância. A quantidade de água é variável dependendo do tamanho do sistema; para residências, geralmente é de 20 a 75 litros por minuto. Águas de baixa qualidade podem causar sérios problemas no sistema, pois podem entupir os registros. Leis locais de proteção ambiental podem restringir ou proibir do uso do sistema. Esse sistema é principalmente utilizado em instalações industriais ou habitações coletivas,

permitindo explorar grandes quantidades de calor a custos relativamente baixos (FISK; TURIEL, 1995).

Os sistemas abertos, que utilizam o ar como fluido, podem captar e insuflar o ar de dentro da própria edificação ou captar ar no exterior e injetá-lo no interior. O primeiro modelo é mais difundido e empregado, principalmente em estufas vegetais. O segundo apresenta uma maior renovação do ar e é conhecido como ventilação pelo subsolo (LENGEN, 2004).

As transferências térmicas entre o ar dos dutos e o solo influenciam-se mutuamente, indicando que há acoplamento entre os gradientes de temperatura desses dois elementos. O solo que envolve os dutos é um meio poroso insaturado, caracterizado por espaços (poros) onde existem água e ar. Assim sendo, em resposta ao gradiente de temperatura produzido pelo escoamento interno, há diferenças simultâneas de calor e de umidade no solo, devido à ação combinada dos gradientes de temperatura e de umidade (LOMBARDI, 2005).

Foram localizados na bibliografia 3 sistemas do uso indireto do calor do solo: as bombas de calor, a ventilação por tubos enterrados e a ventilação natural pelo subsolo.

2.2.2.1 Bombas de Calor

Segundo o site da *International Ground Source Heat Pump* (IGSHPA, 200-), bombas de calor são sistemas movidos a energia elétrica que utilizam a energia do sol armazenada no solo ou no ar. Esses sistemas utilizam a temperatura relativamente constante do solo para prover aquecimento ou refrigeração do ar, além de água quente para casas e edificações comerciais.

As bombas de calor, através de um compressor, transferem o calor de fontes naturais para a edificação durante o inverno, e o oposto durante o verão. Elas também podem prover água quente, controle de umidade e controle da infiltração de ar. A eficiência é alta devido ao transporte de calor de um ponto para outro, sendo melhor que a criação de calor através da combustão (IGSHPA, 200-).

Embora o princípio exista desde o início do século XX (geladeiras e condicionadores de ar são bombas de calor), para aquecimento residencial, ele não foi adaptado, até os anos 70. Mesmo após os 30 anos seguintes de avaliação, esse sistema ainda não é totalmente entendido

e apreciado pela população. O sistema de bombas de calor não pode ser substituído por um sistema solar passivo em qualquer situação, pois o segundo não funciona em invernos frios e nublados dos climas nórdicos (FISK; TURIEL, 1982), enquanto o primeiro atua sem restrições.

O fluido que circula em um sistema de bombas de calor varia conforme o equipamento instalado e a configuração do sistema, podendo ser água, ar ou gás refrigerante. O uso do ar é o mais comum, podendo ser utilizado em praticamente qualquer situação. A água é utilizada em situações onde as condições do ambiente permitem e o gás quando se pretende um alto rendimento do sistema (FISK; TURIEL, 1995).

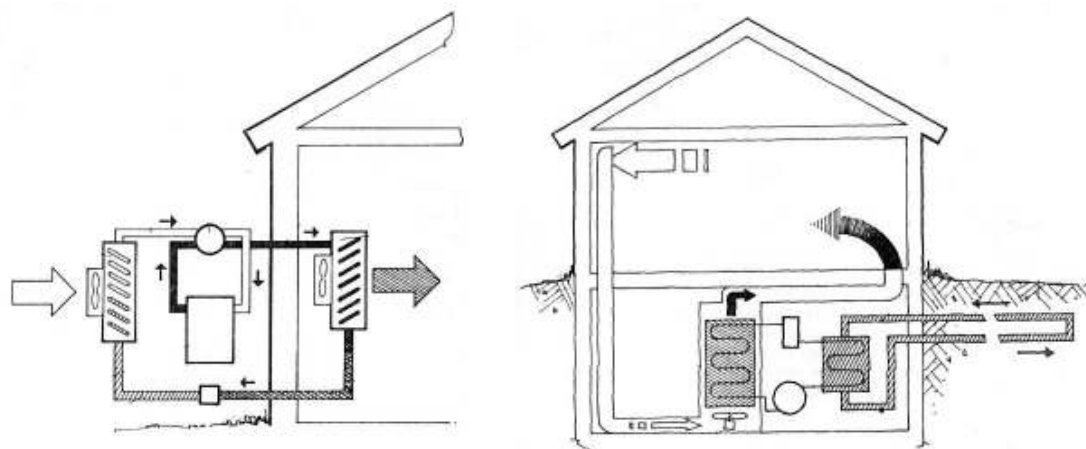


Figura 4: esquema do sistema de bombas de calor fonte-ar típico (esquerda) e fonte-solo típico (direita) (fonte: FISK; TURIEL, 1995)

Existem dois modelos de bombas de calor (figura 4): os que utilizam o ar interno da casa para pré-aquecer ou pré-refrigerar o ar novo (sistema de bombas de calor fonte-ar¹) e os que utilizam a terra para o mesmo fim (sistema de bombas de calor fonte-solo ou *GeoExchange*). Embora o sistema fonte-ar, se bem dimensionado, possa ser utilizado mesmo em climas mais

¹ Não foram localizados textos em português que se refiram aos termos ground-source e air-source, neste trabalho se adotou a tradução fonte-terra e fonte-ar, respectivamente.

severos, ele consumirá mais energia quando comparado ao sistema fonte-solo, que é útil e econômico em qualquer tipo de clima. (FISK; TURIEL, 1995).

Os sistemas fonte-ar consomem entre 25% e 50% menos eletricidade que sistemas de óleo e gás natural e até 70% menos eletricidade que sistemas de ar condicionado (dados adquiridos nos EUA). O GHPC (*Ground-source Heat Pump Council*) estima que, se comparado com sistemas tradicionais de aquecimento e resfriamento, o sistema tenha reduzido 1,5 milhões de toneladas de gases emitidos por estufas e/ou 300 trilhões de Btus, em 2005. Inclusive, a Agência de Proteção Ambiental Americana destaca que o sistema é o mais energeticamente eficiente, mais ambientalmente limpo e com melhor relação custo-benefício entre os sistemas de condicionamento de ambientes (IGSHPA, 200-).

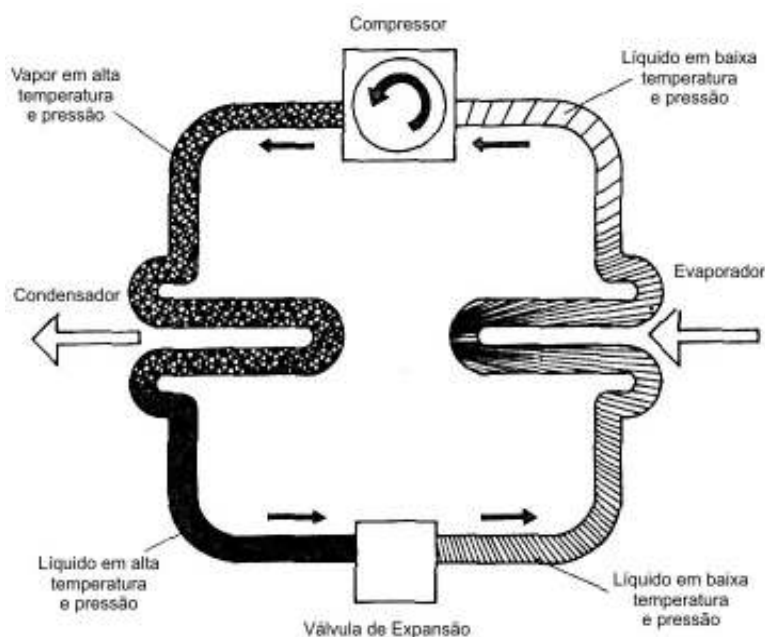


Figura 5: sistema de operação básico das bombas de calor (fonte: FISK; TURIEL, 1995)

A figura 5 mostra de maneira esquemática o sistema de operação do sistema de bombas de calor. As válvulas permitem o ciclo reverso do sistema, possibilitando aquecimento e resfriamento. Os trocadores de calor são feitos de tubos em serpentina para aumentar a superfície de contato e transferir o calor de um meio para o outro (fonte → gás refrigerante → ambiente). Caso necessário, uma fonte alternativa de calor é instalada, para casos onde a temperatura

externa possa cair drasticamente e impeça que as bombas de calor aqueçam devidamente o ambiente. Os termostatos garantem que as condições internas respeitem parâmetros de mínimo e de máximo de temperatura. É possível utilizar-se também de termostatos externos ou programáveis com horário, para melhorar a eficiência do sistema (FISK; TURIEL, 1982).

Sistemas fonte-solo são compostos de três equipamentos: o grupo de tubos no subsolo exterior à casa, a unidade de bombeamento interna e o sistema de distribuição do ar. Por não existir unidade externa exposta, não ocorrem problemas de vandalismo, de congelamento, de danos por gelo ou por neve, nem outros incidentes climáticos (FISK; TURIEL, 1995).

2.2.2.2 Dutos Enterrados

O fluido que circula em um sistema de dutos enterrados pode ser água ou ar. O uso do ar é o mais comum, podendo ser utilizado em praticamente qualquer situação. Boulard e Baille (1986) constataram que o sistema terra-ar induz menos perdas de eficiência que o sistema ar-água.

Existem vários exemplos de uso de tubos enterrados em estufas, como demonstrado por Santamouris et alli (1996). Os tubos geralmente são de plástico, de alumínio ou de concreto, de diâmetros entre 10 e 20cm. Eles são enterrados a profundidades entre 0,5m e 2,0m abaixo da estufa, em uma ou duas linhas horizontais espaçadas em aproximadamente de 0,4m. Estufas que contêm tubos enterrados têm um consumo anual de energia reduzido em 30-60% em relação a estufas convencionais. A temperatura interna é de 3 °C a 10 °C maior que a temperatura externa (SANTAMOURIS et alli, 1996). Segundo Hollmuller (2004), para que ocorra pré-aquecimento no inverno, é necessária a estação quente.

O estudo da bibliografia permite concluir que a eficiência do sistema dos tubos enterrados depende das características do tubo (material e diâmetro), da configuração do sistema (distância entre eixos, comprimento, inclinação, profundidade e velocidade de circulação do fluido) e das características do solo (difusidade térmica, umidade e tipo de cobertura). Santamouris e Lefas (1986) colocam que seu correto dimensionamento exige o conhecimento aprofundado sobre os ciclos diário e anual de temperatura do ar e do solo. Tzaferis et alli (1992) comentam que as fórmulas logarítmicas desenvolvidas pelos centros de pesquisa na Europa e na América

do Norte permitem simular seu comportamento com um erro médio de aproximadamente 3,3%.

2.2.2.3 Ventilação Natural através do Subsolo

Um sistema derivado e variante do sistema de dutos enterrados é a ventilação através do subsolo. Sua principal diferença (e característica) é a inexistência de componentes mecânicos para a circulação de ar. Essa peculiaridade exige que o sistema apresente uma forma linear e seja aberto nos meios exterior e interior.

Lengen (2004) coloca que este sistema é uma forma de ventilar o ambiente por diferença de temperatura e, para que ocorra de uma maneira eficiente, é preciso uma abertura na parte superior da casa, permitindo que o ar quente saia. A tubulação deve passar pelo menos a 2,0m de profundidade. Para refrigerar, o adequado são manilhas de drenagem de barro ou de cimento com diâmetro de 0,10m. Deve-se proteger a entrada de ar com um chapéu de lata para que não entre chuva, mas deixando passar o ar. A entrada de ar no ambiente deve ter uma tela de mosquiteiro para que não entrem insetos. A tela é fixada em uma moldura aparafusada na parede, para facilitar sua limpeza periódica. Sobre a tela de mosquiteiro, colocamos um gradil para controlar a entrada de ar, como vemos na figura 6.

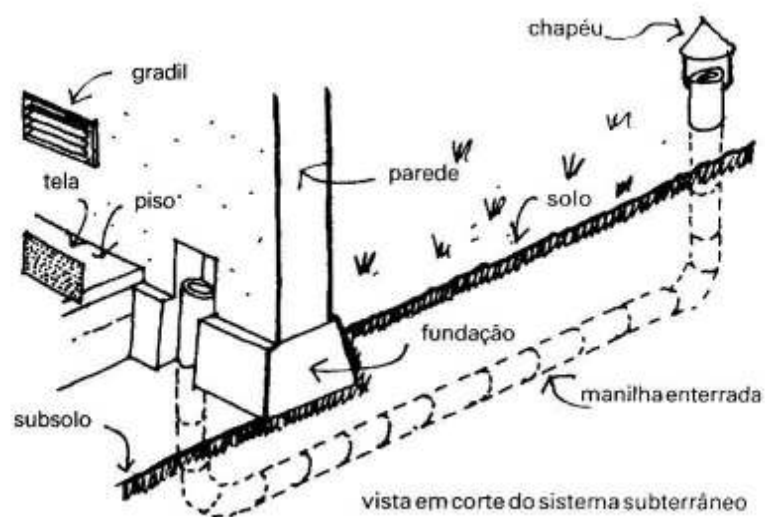


Figura 6: esquema de ventilação pelo subsolo (fonte: LENGEN, 2004)

A saída de ar pode ficar escondida sob um banco ou base de armário. Este tipo de ventilação não funciona quando o nível do lençol freático está acima do nível dos tubos enterrados. O tamanho das manilhas depende da temperatura e da umidade do subsolo, do tamanho dos quartos, da vegetação e do tamanho do terreno. Caso o terreno seja curto, é possível fazer tubos separados para cada cômodo da casa (LENGEN, 2004).

2.3 INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA NA EFICIÊNCIA DAS TROCAS DE CALOR COM O SOLO

Como anteriormente colocado, os tubos enterrados permitem o uso da inércia do solo de forma indireta. Entretanto, estudos sobre o comportamento da ventilação pelo subsolo são raros e não foram localizadas pesquisas conclusivas sobre o assunto. Os poucos exemplos encontrados apresentam dados escassos e nenhuma fonte que permita a comparação entre os sistemas. Devido a similaridades nas configurações dos sistemas, este capítulo apresenta conclusões de trabalhos pertinentes aos três sistemas acima descritos (bombas de calor, tubos enterrados e ventilação pelo subsolo).

Na revisão de bibliografia, identificamos que, atualmente, existem três pólos de estudos sobre o uso da inércia do solo para condicionamento de ambientes: Grécia, Suíça e os Estados Unidos. Outros estudos foram encontrados, inclusive no Brasil, mas todos estavam conectados de alguma forma a esses centros principais.

2.3.1 Modelos Matemáticos

Como em qualquer outro sistema baseado em energias renováveis, o uso de tubos enterrados necessita de um dimensionamento cauteloso e complexo (HOLLMULLER; LACHAL, 2001). Como visto por Santamouris et alli (1995 e 1996), Hollmuller (2003) e Lombardi (2005) ele envolve características do tubo (material e diâmetro), da configuração do sistema (distância ente eixos, comprimento, inclinação, profundidade e velocidade de circulação do fluido) e das características do solo (difusidade térmica, umidade e tipo de cobertura).

Para simular sua eficiência e determinar seu dimensionamento, vários algoritmos foram propostos, cada um deduzindo e validando um específico parâmetro (TZAFERIS et alli, 1992). As fórmulas logarítmicas desenvolvidas pelos centros de pesquisa, na Europa e na América do Norte, permitem simular seu comportamento com um erro médio de 3,2% (SANTAMOURIS et alli, 1996). Contudo, há importantes dependências e variabilidade do desempenho do sistema em função das características térmicas e geométricas. Conseqüentemente, tais algoritmos não são automaticamente válidos para todo conjunto de fatores, e são necessários estudos mais detalhados (TZAFERIS et alli, 1992).

Tzaferis et alli (1992) realizaram um estudo comparativo entre oito algoritmos para dimensionamento de dutos enterrados. Eles foram classificados em dois grupos. O primeiro grupo inclui os que primeiro calculam a transferência de calor convectiva da circulação do ar no tubo e depois a troca de calor por condução do tubo para o solo e dentro da massa do solo. Os inclusos nesse grupo necessitam, como dados de entrada, as características geométricas do sistema, as características térmicas do solo, as características térmicas do tubo e a temperatura do solo não variável. O segundo grupo inclui os que calculam somente a convectividade da transferência de calor da circulação do ar dentro de um tubo. Eles necessitam, como dados de entrada, as características geométricas do sistema, as características térmicas do tubo e a temperatura da superfície do tubo. Como é possível observar, as fórmulas matemáticas desenvolvidas não consideram todos os parâmetros existentes.

O referido autor estudou o algoritmo de Schiller (1982), o algoritmo de Santamouris e Lefas (1986), o algoritmo de Rodriguez et alli (1988), o algoritmo de Levite et alli (1989), o algoritmo de Motta e Younf (1985), o algoritmo de Elmer e Schiller (1982), o algoritmo de Sodha et alli (1984) e o algoritmo de Chen et alli (1983). Todos os algoritmos apresentam um erro em torno de 3,4%, à exceção de Shodha et alli, 1984 e o algoritmo de Schiller, 1982, que apresentam erros de 4,3% e 5,4% respectivamente.

Os resultados dos algoritmos estudados por Tzaferis et alli (1992) demonstram que, com o aumento do comprimento do tubo, é previsto um aumento rápido da troca de calor com o solo até o limite de 50m, a partir do qual as trocas de temperatura se mostram praticamente nulas. O aumento do diâmetro se mostra desfavorável para a troca de calor, pois a velocidade é constante e, embora a superfície de contato aumente linearmente, a vazão aumenta exponencialmente. Sendo assim, a variação de temperatura reduz-se rapidamente até 0,15m e se mantém

praticamente constante a partir dos 0,2m. Já com o aumento da profundidade, a temperatura de saída decresce exponencialmente.

O autor conclui, assim, que somente mudanças dentro de certo limite de velocidade do ar dentro do tubo, bem como de seu comprimento e de seu diâmetro podem mudar a temperatura de saída. Após este limite, as mudanças não são muito eficientes. O autor comparou, também, os resultados das simulações com os obtidos em um protótipo experimental e constatou que todas as linhas médias estavam bastante precisas, porém as máximas e mínimas apresentavam maiores diferenças, como vemos na figura 7.

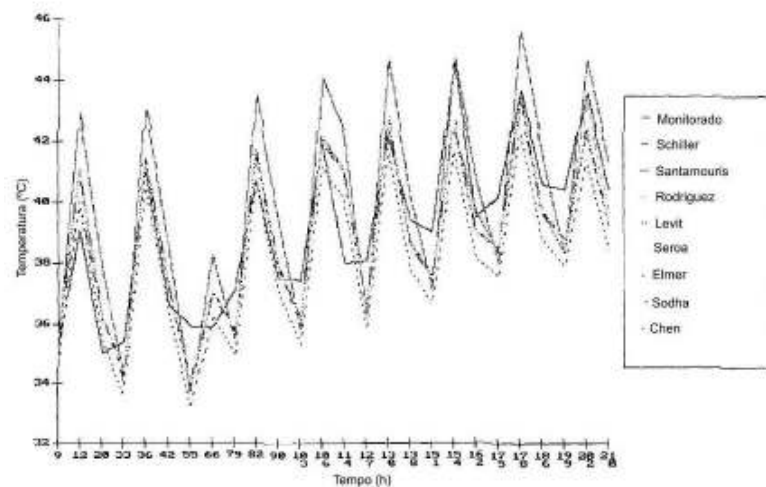


Figura 7: gráfico demonstrando os resultados das comparações de logaritmos executado por Tzaferis (fonte: TZAFERIS et alli, 1992)

Gauthier et alli (1997) sugerem a substituição de dutos de seção circular por dutos de seção quadrada de área de superfície iguais através da fórmula: $L = \sqrt{\pi} / 2.D$. O autor esclarece que, assim, ocorre redução no tempo de cálculo, uma vez que o modelo matemático apresenta linhas paralelas e perpendiculares com a superfície (e conseqüentemente também com o gradiente de temperatura). Lombardi (2005) utiliza este conceito e também constata que a diferença nos resultados é insignificante.

Kabashnikov et alli (2002) colocam a dificuldade de pré-dimensionamento dos tubos e sugere o uso de método rápido e relativamente simples de cálculo, embora ainda rigoroso. Considera que a temperatura do solo é constante abaixo de 1m, que a distância entre tubos permite seu

cálculo independente, que a temperatura ao longo do tubo é constante e que a bomba de ar independe do tempo. Nesse modelo simplificado, devido à exclusão da influência de convecção dentro do tubo, quanto mais lento o fluxo de ar e mais estreito o tubo, mais próximo o valor obtido será do resultado experimental.

Hollmuller (2003) desenvolveu um modelo matemático que depois foi validado em uma solução analítica e em monitoramento *in loco*. O modelo permite geometria flexível com diferentes tipos de solo e condições de borda. Permite estudo da difusão de calor nas três dimensões, leva em consideração os calores latente e sensível, permite o ensaio com infiltração de água, permite o controle do sentido do ar e é compatível com o sistema TRNSYS.

2.3.2 Variáveis do Sistema

Conforme visto anteriormente, uma série de variáveis interfere no comportamento dos dutos enterrados. Na seqüência, serão descritas as mais relevantes destacadas pela bibliografia, como se comportam e como diferentes autores abordaram o tema.

2.3.2.1 O Clima

Um projeto energeticamente eficiente de edificações requer um detalhado e aprimorado conhecimento da amplitude e da distribuição da temperatura do ambiente (TSELPIDAKI et alli, 1993). O sistema de tubos enterrados exige o mesmo cuidado, principalmente com os ciclos diários e anuais (SANTAMOURIS et alli, 1996). O desenvolvimento recente de importantes técnicas de uso passivo de energia solar tem oferecido uma análise detalhada das informações sobre os dados de temperatura ambiente. Contudo, a compilação dos dados é feita principalmente para motivos de aquecimento, e pouca informação é executada para o projeto e a avaliação de sistemas de refrigeração ou para avaliar o desempenho de edificações no verão (TSELPIDAKI et alli, 1993).

Técnicas e sistemas passivos e híbridos requerem informações adicionais às tradicionalmente coletadas, a exemplo do potencial de ventilação noturno, tais como a variação diária de temperatura com valores máximos e mínimos, a frequência e a distribuição das temperaturas em

porcentagem e o número de dias consecutivos com temperatura acima de um determinado valor (HOLLMULLER, 2004 e TSELPIDAKI et alli, 1993). Não foi encontrado qualquer trabalho ou medição desta natureza com dados em períodos relevantes para o estado do Rio Grande do Sul.

Tselpidaki et alli (1993) colocam que o dimensionamento de sistemas de refrigeração com base nas normas da ASHRAE leva ao super-dimensionamento do sistema de refrigeração e é inapropriado para o dimensionamento de técnicas passivas e híbridas, baseadas na dissipação natural para armazenadores de calor (convecção, evaporação, radiação e contato).

Não é do conhecimento do autor a existência de trabalhos que descrevam da relevância do clima sobre a ventilação pelo subsolo. Imagina-se, porém, que entre os elementos climáticos possíveis de apresentar influência estão: a temperatura do ar, a radiação solar, o vento (velocidade e direção) e a pluviosidade.

2.3.2.2 O Solo

Como visto anteriormente, o principal responsável pelo aquecimento do ar é o solo. Este fenômeno faz com que as variações de temperatura do solo e do ar ocorram de maneira senoidal similar. Para prever o funcionamento das técnicas de captação do calor do solo direta ou indireta, é necessário o conhecimento deste perfil da variação da temperatura do solo em várias profundidades, ao longo do dia e do ano (JACOVIDES et alli, 1996 e SANTAMOURIS et alli, 1996).

2.3.2.2.1 Tipos de solo

O tipo de solo interfere significativamente no processo de troca de calor com os dutos. Quanto maior a condutividade, maior será a troca térmica (BOJIÉ et alli, 1997). O calor no solo se armazena de maneira latente e pode ser guardado dessa forma por entre 10h e 12h. Assim, é possível armazenar o calor durante o dia e utilizá-lo à noite (SANTAMOURIS et alli, 1996).

Como será visto na seqüência, solos mais úmidos têm maior capacidade calorífica. Essa propriedade é mais importante para situações onde os dutos estão mais próximos e são mais cur-

tos. No momento em que distanciamos os tubos ou aumentamos seu comprimento, essa propriedade é minimizada, chegando a ser independente o armazenamento de calor no solo para distâncias entre eixos de mais de 0,25m para qualquer comprimento. Esta conclusão é apontada por Lombardi (2005) para solos com fator de umidade acima de 25%, velocidade abaixo de 4m/s e diâmetro do tubo de 0,10 m como demonstrado na figura 8.

Desta forma, é correto afirmar que, em climas com grande amplitude térmica diária, é preferível solos com baixa difusidade térmica, que permitam a utilização do calor armazenado. Para situação de clima predominantemente quente ou frio, o ideal são solos com maior dissipação de calor (LOMBARDI, 2005).

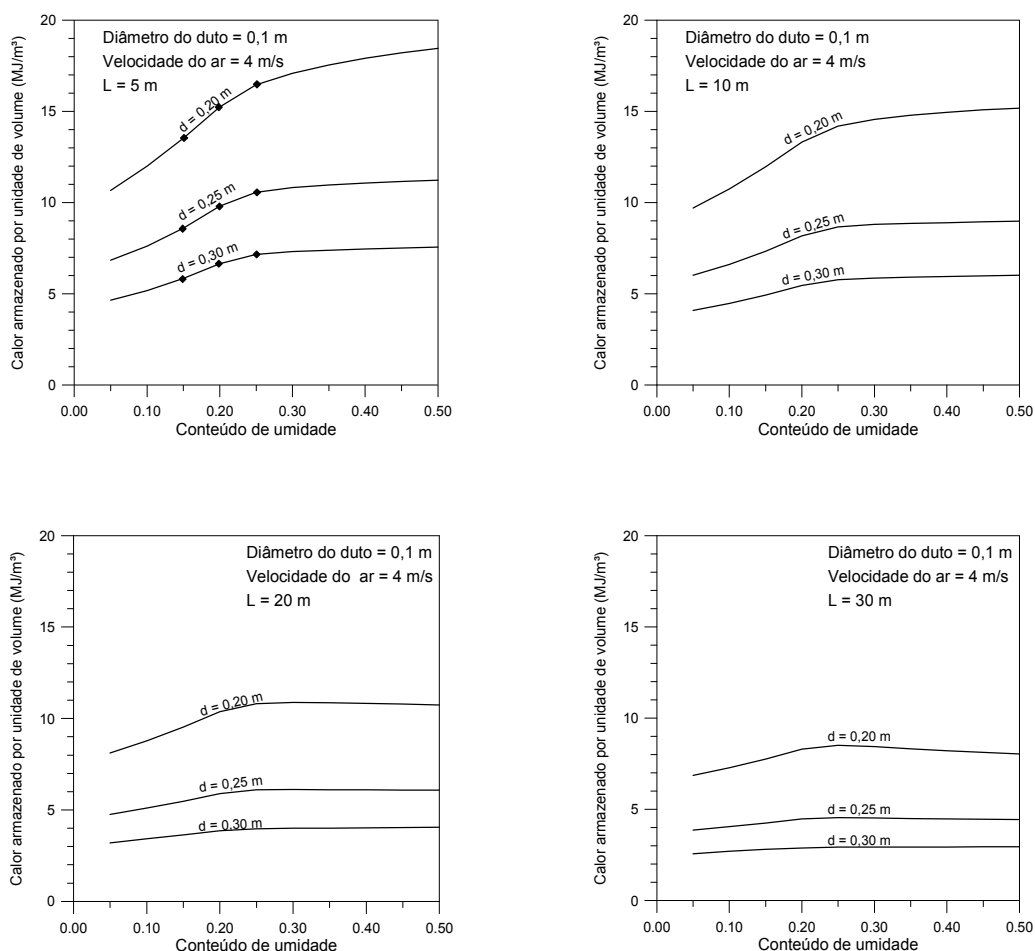


Figura 8: gráficos demonstrando o calor armazenado no solo em função do conteúdo de umidade (%) (fonte: LOMBARDI, 2005)

2.3.2.2.2 Profundidade

A temperatura do solo varia com a profundidade. Quanto maior a camada de solo, maior será sua capacidade calorífica e maior também o seu potencial de aquecimento ou resfriamento. As variações diárias e sazonais no subsolo, porém, são pequenas a profundidades de apenas alguns metros (SANTAMOURIS et alli, 1996). Segundo Kurpaska et alli (2004), esse efeito ocorre porque a influência da radiação solar diária na temperatura do solo é insignificante abaixo de 0,15m e, na umidade, é insignificante abaixo de 0,25m (figura 9).

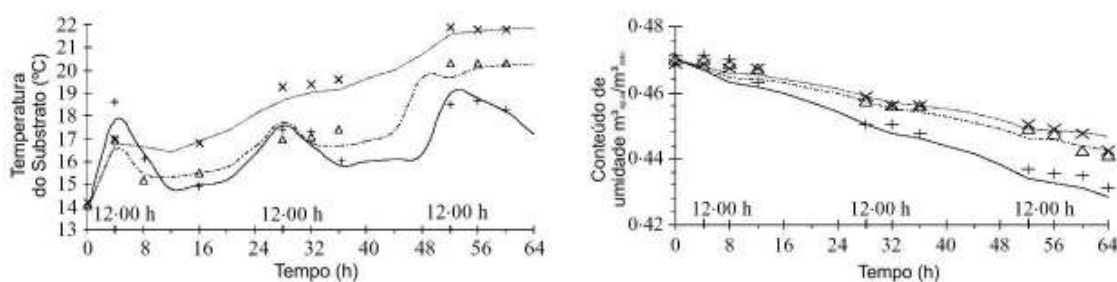


Figura 9: gráfico demonstrando os resultados calculados (linha) e medidos (símbolo) para as mudanças dinâmicas no substrato para temp. (esquerda) e conteúdo de água (direita). (legenda: ---- +: 5cm; -.-.- Δ: 15cm; x: 25cm) (fonte: KURUPASKA et alli, 2004)

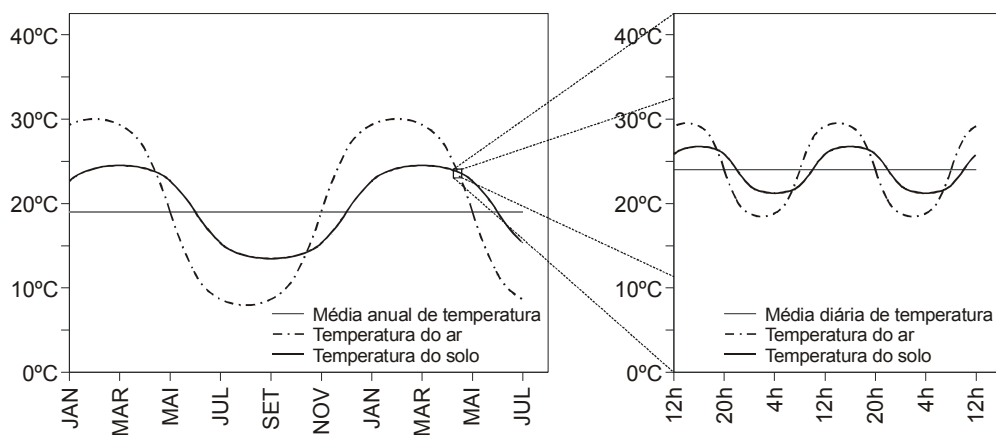


Figura 10: gráfico da curva ideal anual e diária de temperatura do solo e do ar

Vaz e Sattler (2004) colocam que dependendo da difusividade do solo, as profundidades do solo que são influenciadas pelos ciclos diário e anual se alteram. Segundo os autores, o limite da profundidade do solo que sofre variação diária equivale aproximadamente 1/15 da profundidade que sofre variação anual. Os autores colocam ainda que, abaixo dessa profundidade, a temperatura é constante e próxima à média anual de temperatura. Dessa forma, temos uma variação senoidal anual que varia em torno da temperatura média do ano e uma variação senoidal diária em torno da média do dia, como mostrado a figura 10.

É importante ressaltar que as medições sobre a temperatura do solo, a várias profundidades, são espacial e temporalmente limitadas. Os dados de temperatura existentes, bem como as propriedades do solo, só podem ser utilizados localmente (JACOVIDES et alli, 1996).

Uma vez implantado o sistema de dutos, ocorre uma modificação no comportamento térmico do solo, como vemos na figura 11, de Kurpaska et alli (2004). O aumento da temperatura do substrato durante o processo passa a ser resultado de duas trocas de calor que afetam o substrato: o calor dos dutos e a radiação do sol. É bom observar que a radiação do sol é cíclica e, com a chegada do verão, transfere cada vez mais calor para o solo com o aumento dos dias.

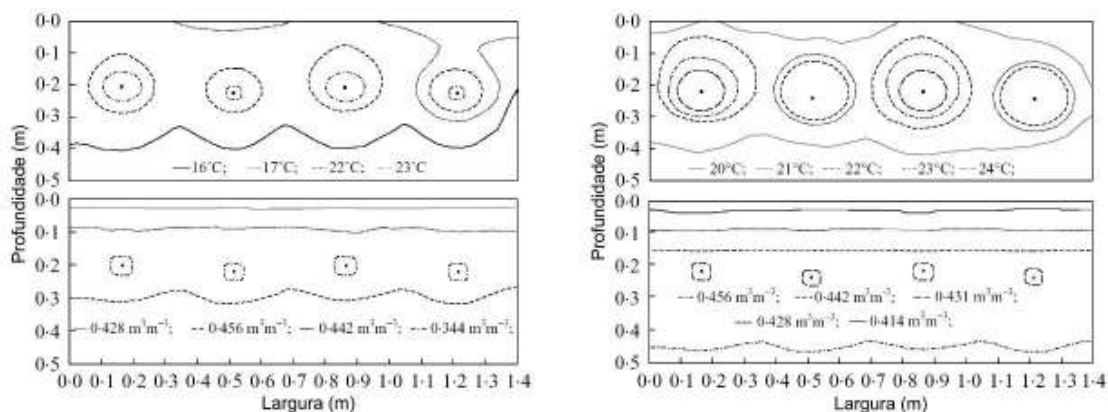


Figura 11: gráfico demonstrando as isolinhas de temperatura e conteúdo de água no substrato após 48h (esquerda) e 64h (direita) (fonte: KURPASKA et alli, 2004)

Hollmuller (2004) coloca que o ideal para o pré-aquecimento é a colocação de tubos entre 2m e 3m de profundidade, para não sofrerem com a variação diária de temperatura. Caso os tubos estejam colocados no subsolo da edificação, eles devem estar distanciados em, pelo menos

3m, ou poderá ocorrer perda energética. Para o resfriamento, o ideal são profundidades em torno de 0,50m.

2.3.2.2.3 Cobertura do solo

Em estudos comparativos com solos cobertos por asfalto e crus, Santamouris et alli (1996) observaram que diferentes coberturas do solo causam impactos sobre o desempenho dos trocadores de calor, dependendo das características da superfície do solo. Com base em estudos similares, Hollmuller (2004) sugere, para resfriamento, profundidades de 0,50m dos tubos enterrados para áreas sombreadas. Essa profundidade, porém, aumenta para entre 1m a 2m nas áreas com elementos na superfície de grande absorção de radiação solar.

Mihalakakou et alli (1996), em Atenas, através de estudos em solos cobertos com vegetais, apresentam resultados similares. Segundo seus estudos, durante o inverno, solos cobertos apresentaram temperaturas de 1°C a 1,5°C menores que os expostos. Já no verão, os solos cobertos apresentaram as temperaturas em média 8°C abaixo das registradas nos solos descobertos, chegando a 12°C em dias de grande insolação. No período da noite, os solos cobertos ficaram em média entre 1°C e 2°C mais quentes que os cobertos durante todo o ano. O autor conclui que solos cobertos por vegetais são mais isolantes, reduzindo positivamente suas variações térmicas.

2.3.2.2.4 Umidade

Puri (1986) concluiu de que os movimentos de umidade produzem efeitos na transferência de calor no solo, porque sua difusividade térmica varia com o conteúdo de água. Ferreira (1993), estudando cabos de alta tensão enterrados, conclui que, a altas temperaturas, ocorre a migração da umidade de locais mais quentes (próximos do tubo) para regiões mais frias, onde condensam. A baixa umidade reduziu a condutividade térmica dos solos, gerando um superaquecimento dos cabos e, conseqüentemente, sua ruptura.

Esse fenômeno ocorre devido à atuação de dois processos no solo adjacente aos dutos: trocas de calor e trocas de massa (água do solo). O processo de troca de calor é conseqüência da di-

ferença de temperatura entre a área quente dos tubos e as partículas do solo. Isto resulta em uma região de temperaturas não-uniformes adjacentes ao substrato do solo, que gera fluxo de água. Como consequência desse mecanismo, ocorrem trocas de calor e de massa no leito do solo, resultando em aumento da temperatura e em redução da umidade (KURPASKA et alli, 2004).

Gautiher et alli (1994), conduzindo uma análise dimensional do processo de transferência de calor em solos que sofreram uma variação de temperatura de até 10°C por um período de 24 horas, concluíram que os fluxos de umidade contribuem com menos de 0,1% do calor total transferido no solo, sendo considerado insignificante. Essa é a principal justificativa para não incluir a variação de umidade no estudo do sistema trocador-armazenador de calor no solo. Lombardi (2005), através de simulações matemáticas, confirma os dados encontrados pelos autores acima citados, sendo a umidade do solo irrelevante para o calor armazenado nos solos no caso de dutos enterrados para ventilação. Kurpaska et alli (2004), porém, através de simulações e estudos em campo, encontraram uma variação de umidade de 9%, o que discorda das conclusões de Puri (1986), de Gautiher et alli (1994) e de Lombardi (2005), embora também coloque que o valor seja desprezível.

2.3.2.3 Os Dutos

Este capítulo trata da importância das características dos dutos bem como de suas propriedades físicas para os resultados obtidos.

2.3.2.3.1 Diâmetro do duto

É previsível que o aumento do diâmetro reduza a temperatura final do ar de saída, devido ao maior volume de ar em transição (para uma mesma velocidade). Além disso, Santamouris et alli (1996), em ensaios com tubos de 0,12m, 0,18m e 0,25m e com velocidade constante, concluíram que o aumento do diâmetro dos tubos reduz também a transferência de calor por convecção no interior do duto, acarretando na diminuição de trocas térmicas entre o ar e o solo, reduzindo a capacidade do sistema.

Lombardi (2005) chegou a uma conclusão semelhante, observando que, em tubos de menor diâmetro, as diferenças entre as trocas de calor com o solo são mais acentuadas do que com os de maior diâmetro. Ele destaca, porém, que tubos com maior diâmetro perdem menos eficiência caso seu comprimento seja aumentado.

2.3.2.3.2 Comprimento dos Dutos

O aumento do comprimento do tubo aumenta a área de contato com o solo, facilitando as trocas térmicas com o solo (SANTAMOURIS et alli, 1996). Porém, as trocas térmicas entre o ar e o solo decrescem exponencialmente ao longo do duto, pois a diferença de temperatura do ar e o solo, ao longo do tubo, diminui (LOMBARDI, 2005). Isso quer dizer que a capacidade de trocar calor do solo aumenta com o aumento do tubo até um “ponto de saturação”, que depende da frequência de oscilações da temperatura e do volume de ar circulando no interior do duto. O “ponto de saturação” ocorreria quando a temperatura do ar se iguala à temperatura das paredes dos tubos (KABASHNIKOV et alli, 2002).

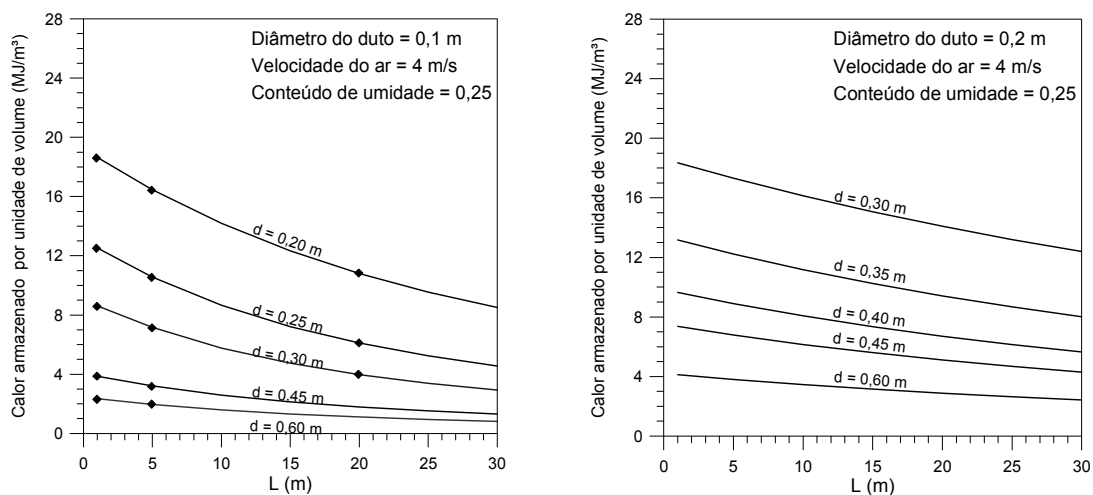


Figura 12: gráfico do calor armazenado no solo em função do comprimento do duto (fonte: LOMBARDI, 2005)

Gauthier et alli (1997), em estudos com tubos de diâmetro de 10,8cm, descrevem como intervalo ideal para tubos enterrados as faixas entre 5m e 20m e denominam os tubos maiores de

“dutos de grande comprimento”. Esse comprimento máximo representa a saturação dos tubos para esse diâmetro.

Lombardi (2005) observa que tubos com maior diâmetro apresentam menor perda de eficiência com seu aumento do comprimento e disposição mais linear na perda de calor para o solo por comprimento, como observa-se na figura 12. Ou seja, tubos com maior diâmetro aumentam o limite de saturação de 20m, recomendados por Gauthier et alli (1997), em decorrência do aumento de superfície e da vazão.

2.3.2.3.3 Velocidade / vazão

A renovação do ar tem um efeito negativo no inverno e deve ser mantido em níveis mínimos. No verão tem efeitos positivos quando acoplado com um *buffer* inercial, como o sistema de tubos enterrados (HOLLMULLER; LACHAL, 2001).

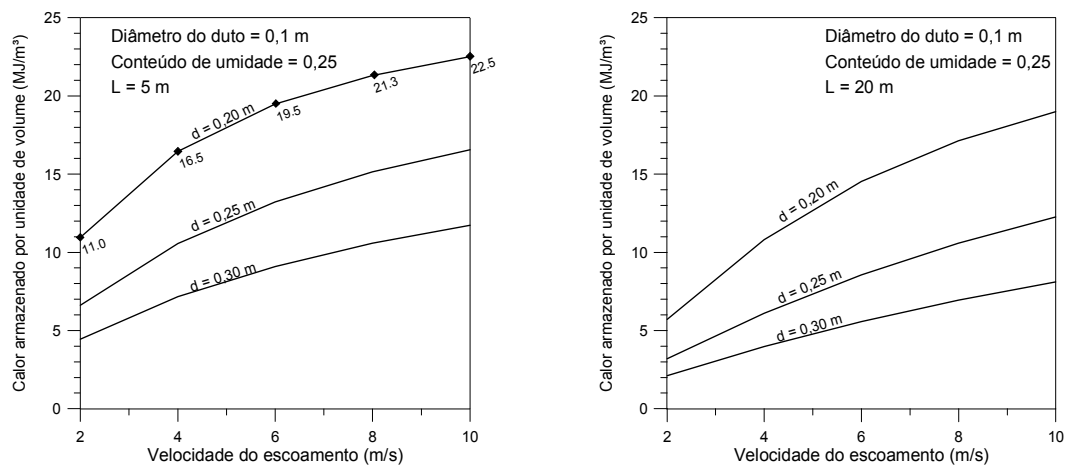


Figura 13: gráfico do calor armazenado no solo em função da velocidade de escoamento do ar (fonte: LOMBARDI, 2005)

O aumento da velocidade de escoamento do ar dentro do duto aumenta as trocas térmicas entre o ar e o solo, pois há um incremento no fluxo de massa dentro do tubo. Esse crescimento não é linear, como indica a figura 13 (LOMBARDI 2005). Gauthier et alli (1997), baseado em modelagens em dutos isolados, recomendam velocidades de 4m/s para o escoamento máximo

dentro dos dutos, alegando que valores maiores são contrabalançados pelo crescimento substancial da potência do sopro (proporcional ao quadrado da velocidade de escoamento).

O sistema de tubos enterrados pode ser utilizado da mesma forma que a ventilação noturna, fornecendo grande volume de ar quando a temperatura final do sistema é menor que a temperatura de conforto. Na Europa central, a redução da variação diária de temperatura com tubos enterrados oferece o mesmo resfriamento da ventilação noturna, fornecendo temperaturas em níveis agradáveis mesmo durante as horas quentes (HOLLMULLER, 2004).

2.3.2.3.4 Utilização de água no sistema

Hollmuller e Lachal (2001) observam que a infiltração de água no sistema de dutos, no verão, afeta sensivelmente a extração de calor do ar de uma maneira positiva, aumentando em torno de 26% o resfriamento do ar através da evaporação. Os autores colocam que os parâmetros higiênicos não estão em evidência em seus estudos e que pode gerar problemas de higiene e de proliferação de larvas, uma vez que a água fica parada dentro dos dutos.

2.3.2.3.5 Distanciamento entre dutos

Quanto maior a distância entre os dutos, mais eficiente é o funcionamento do sistema (figura 14). A redução do espaço entre os dutos representa uma perda de 5% a 15% da capacidade de troca com o solo por metro. À distância de 1m, os solos perdem entre 10% e 25 % de capacidade se comparados com o sistema de tubos ideais dispostos em distâncias infinitas. Essa influência praticamente não depende do diâmetro dos tubos (KURUPASKA et alli, 2004). Para caso de dutos muito próximos, a temperatura do solo variará muito rapidamente e ele perderá sua eficiência como trocador de calor caso não tenha uma difusividade térmica adequada, como vemos na figura 14 (LOMBARDI, 2005).

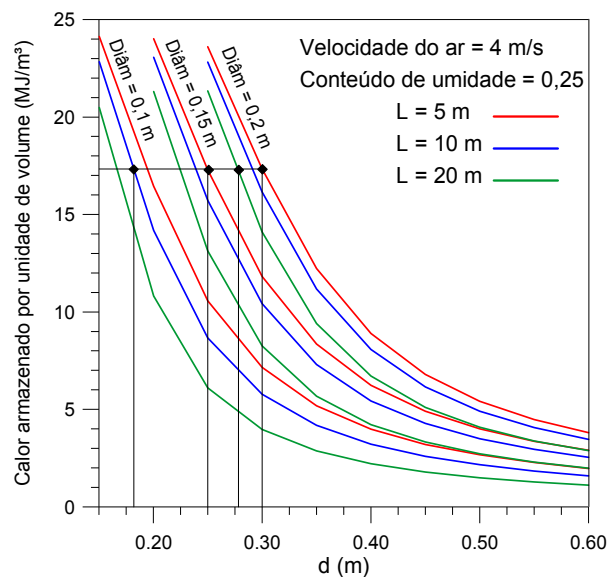


Figura 14: gráfico do calor armazenado no solo em função da distância entre centros dos dutos (fonte: LOMBARDI, 2005)

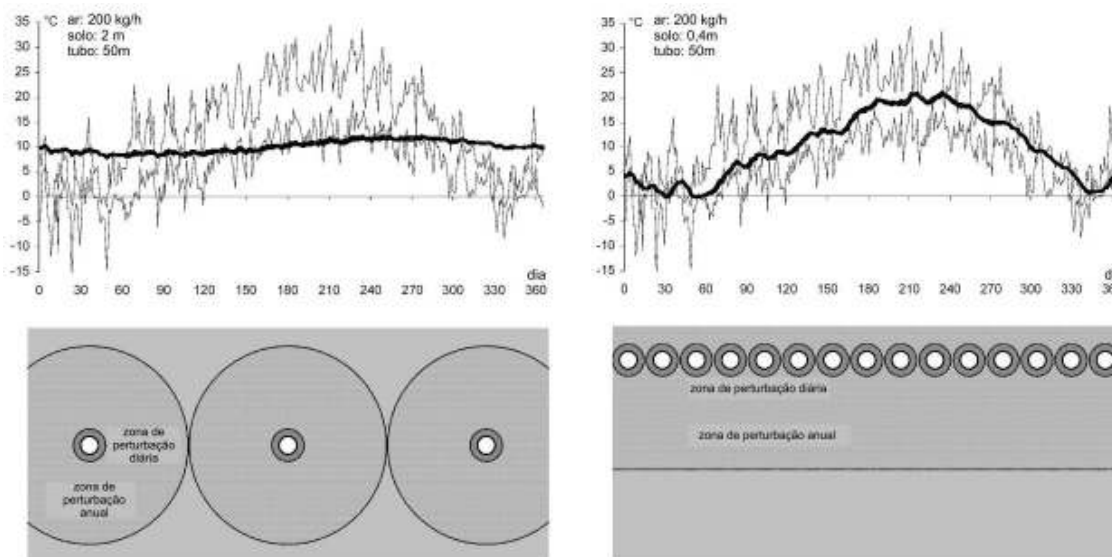


Figura 15: gráficos do distanciamento ideal entre os dutos para a situação de pré-aquecimento (esquerda) e pré-refrigeração (direita) e da temperatura mínima, máxima e interna (fonte: HOLLMULLER, 2004)

Hollmuller (2004) coloca que o ideal, para uma situação de pré-aquecimento, são dutos distanciados equivalentes à zona de perturbação de temperatura anual do duto no solo, enquanto

para pré-refrigeração, o ideal é a colocação de dutos mais próximos, gerando uma zona de perturbação anual linear, como vemos na figura 15.

2.3.2.3.6 *Inclinação*

Não foram localizados estudos quantitativos quanto à influência da inclinação no sistema de dutos enterrados. Lengen (2004) coloca que, para a situação de resfriamento, os dutos podem ser horizontais, contando que haja uma janela alta na peça ventilada. Já na situação de aquecimento, é necessária uma inclinação ascendente da boca de entrada e ar para a boca interna.

2.4 ESTUDOS DE CASO OU EXPERIMENTOS

Existem inúmeros experimentos e edificações onde se utiliza o solo para climatizar termicamente os ambientes, em distintas regiões do globo. Os exemplos aqui demonstrados são os mais representativos em termos de documentação bibliográfica e de demonstração de resultados.

2.4.1 **Complexo de Seis Casas localizadas na Vila Costozza, Itália**

Bottero et alli (1983) descrevem o complexo de seis casas localizadas na vila Costozza, um subúrbio de Longare, no sopé das montanhas Berici, a 10km de Vicenza, Itália. As edificações foram construídas em tempos diferentes, iniciadas no ano de 1550, e sujeitas a várias modificações e renovações nos séculos seguintes. Contudo, todas elas mantêm um denominador comum: seu sistema de refrigeração natural, que utiliza o ar gelado provindo de grandes buracos no subsolo chamados “*covoli*” (parte naturais e parte escavados dentro das montanhas) ao fundo das casas. A temperatura do ar dentro dessas cavernas é bastante estável, aproximadamente entre 11°C e 12°C.

Os mesmos autores colocam que o “*covoli*” se comunica com o exterior através de diversas aberturas localizadas em alturas diferentes. Quando o ar exterior é mais quente que o interior,

é estabelecida uma circulação de ar natural: o ar aquecido entra no “*covoli*” através das aberturas superiores e é refrigerado antes de sair através das aberturas inferiores. Para tirar proveito deste refrigerador natural, as casas foram conectadas às partes inferiores do “*covoli*”, diretamente ou através de túneis cavados no subsolo. Esses túneis chamados “*ventidotti*” (literalmente dutos de vento) chegam a ter algumas centenas de metros.

Segundo os autores, o “*ventidotti*” termina na base das edificações. Através dele, o ar refrigerado chega aos quartos superiores e uma grelha, de pedra ou de mármore, liga esses compartimentos aos do térreo. O efeito refrigerador é considerável, por exemplo, ao final de julho, enquanto a temperatura medida em uma sala onde a grelha estava fechada estava em torno de 20,5°C a 21,5°C, na sala ao lado, com a grelha aberta, o ar estava a uma temperatura de 16°C enquanto o ar exterior estava a 33°C. O sistema de refrigeração das casas de Costozza é famoso e foi admirado nos seus tempos. Há relatos do sistema descritos pelo arquiteto Palladio, no primeiro volume dos seus “Quatro Livros de Arquitetura”.

2.4.2 Escola em La Pampa, Argentina

A escola construída em La Pampa, na Argentina, para alunos de ensino médio, tem 950m². Apresenta três salas de aula, uma área administrativa, uma pedagógica, um auditório multiuso e banheiros. Foi construída de modo a utilizar meios passivos para reduzir a energia, como janelas norte para captação de energia solar no inverno e iluminação natural, ventilação natural por duto de seção retangular e coletores solares para condicionamento de ar (LARSEN et alli, 2003).

O duto único enterrado foi projetado para prover conforto térmico no verão a área de 167m² do laboratório. Foi executado com paredes de tijolo de 0,11m, está enterrado a 0,40m de profundidade, tem 29m de comprimento e seção retangular de 40x65cm. Os últimos metros do tubo estão localizados sob a escola. O ar exterior que circula através do duto entra no laboratório através de uma abertura localizada na parede sul. Essa abertura foi colocada dentro de um *closet* no qual a porta pode ser fechada quando não se desejar renovações de ar (LARSEN et alli, 2003).

Foi monitorada a temperatura e a umidade do ar no interior do tubo (a 6m e 12m de distância), a temperatura do ar externa, as temperaturas do solo a 2m e 4,5m de profundidade sob o laboratório, a radiação solar e a velocidade do vento exterior. As medições ocorreram em 15 dias no verão a cada 15 minutos e em 7 dias no inverno (LARSEN et alli, 2003).

A temperatura do ar no duto foi, em média, aquecida em 1,4°C durante a noite, e resfriada em 1,5°C durante o dia. A amplitude térmica dentro do tubo foi menor que a do ar exterior. A temperatura do ar registrada, no interior da sala, foi sempre superior à temperatura do ar que é insuflado pelo duto, e a velocidade média computada foi de 0,5 m/s. Através de simulações executadas com o programa SIMEDIF, concluiu-se que a presença do tubo não alterou substancialmente a distribuição de temperatura do solo (LARSEN et alli, 2003).

2.4.3 Laboratório de Energia Solar da UFRGS

O prédio do laboratório de pesquisas em energia solar da UFRGS, localizado no Campus Vale dessa universidade, afastado do centro da cidade, foi projetado de acordo com os princípios da arquitetura solar, empregando sistemas passivos para ganho direto e indireto, conforme descrito por Figueira, 2005.

Esse autor coloca que o prédio foi projetado para melhorar o conforto térmico ao longo do ano. É conhecido o fato de que na latitude de Porto Alegre a fachada norte recebe mais radiação solar durante o inverno. Sendo assim, o prédio foi construído alongado no sentido leste-oeste, de modo a dispor uma grande área de janelas para o norte, onde estão também localizados os sistemas passivos.

A forma adotada permite a entrada de luz e radiação solar no interior do prédio durante o inverno, quando se tem as menores altitudes solares, e impede a sua entrada durante o verão, quando se tem as maiores altitudes, através da marquise dimensionada para esse fim. A distribuição dos ambientes também considerou a orientação além do tempo de ocupação. Os locais de serviço estão voltados para a face sul do prédio (que recebe menos radiação e esfria com os ventos desta direção) e as de uso mais freqüente localizam-se a norte (FIGUEIRA, 2005).

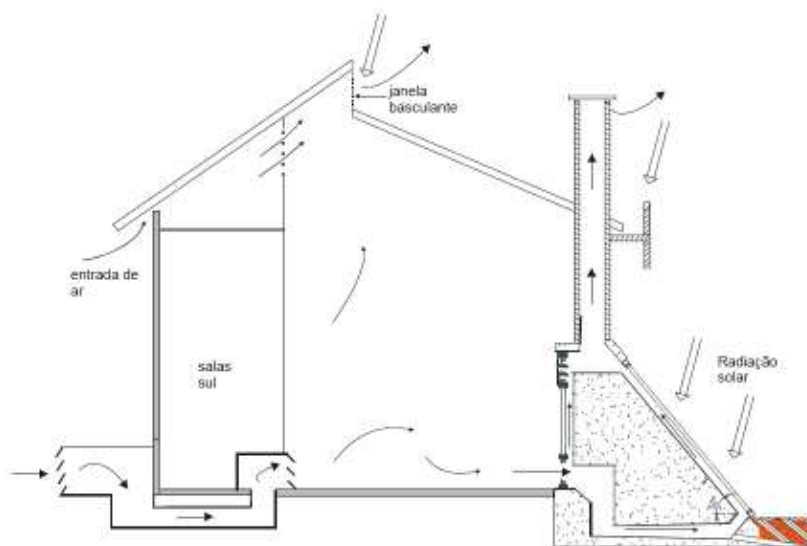


Figura 16: Esquema de circulação natural do ar no interior do laboratório de energia solar da UFRGS durante o verão (fonte: FIGUEIRA, 2005)

Entre os sistemas passivos instalados encontra-se o de ventilação pelo subsolo. A Figura 16 ilustra o modo de operação do sistema no verão. Observe que existe um canal que permite que o ar seja retirado da face sul e inserido no interior do laboratório, produzindo uma ventilação natural. Essa tomada de ar na face sul capta ar de um local sombreado por vegetação. A ventilação é potencializada pela exaustão do ar aquecido pelo coletor solar na fachada norte, através da chaminé. Nos dias em que há vento, as janelas superiores são abertas, proporcionando outra fonte de ventilação. No inverno o sistema fica fechado e opera apenas com o coletor solar acumulador (FIGUEIRA, 2005).

2.4.4 Estufas para Vegetais

Santamouris et alli (1995) colocam que tubos enterrados de plástico ou alumínio são usualmente utilizados em estufas vegetais. Na maioria das vezes, dispostos longitudinalmente, com entrada e saída de ar nas extremidades opostas do ambiente. O ar do interior da estufa circula através dos tubos no subsolo, que atuam como trocadores de calor entre a terra e o ar. O sistema pode atuar tanto para aquecimento durante a noite (quando há perdas de calor para o meio), quanto para resfriamento durante o dia (quando a temperatura do ar interna é elevada, resultado do aquecimento provido pela radiação solar).

Mesmo em dias claros do inverno, os ganhos por radiação solar podem ser grandes, tornando necessário reduzir a temperatura interna. A ventilação natural pode ser usada para remover este calor contido na estufa. Porém, alternativamente, o excesso de calor pode ser removido da estufa e transferido ao solo, que atua como um armazenador de calor para uso posterior (noturno). O ar quente da estufa é circulado através do subsolo pelos tubos e o excesso de calor é transferido para ele. Este processo reduz a temperatura do ar interno a níveis aceitáveis durante o dia, enquanto o excesso de calor é armazenado na forma de calor latente por até 12 horas. Durante a noite, o solo funciona como um fornecedor desse calor em processo similar ao ocorrido durante o dia, somado ao efeito de condução do calor até a superfície, onde por ser transferido ao ambiente por condução e radiação (SANTAMOURIS et alli, 1995).

Estes sistemas podem ser combinados com princípios da arquitetura bioclimática, tanto no caso de estufas quanto de outras edificações térreas, principalmente com paredes trombe voltadas para orientação norte, que servem como sistema armazenador de calor passivo. Materiais com alta inércia térmica, como concreto, blocos de concreto e tonéis de água podem ser usados para absorver a grande radiação solar durante o dia e, durante a noite, transferir esse calor por radiação ou convecção para a estufa. Esta combinação satisfaz entre 30 e 55% das exigências de energia em estufas convencionais (SANTAMOURIS et alli, 1995).

2.4.5 Prédio Caroubier em Genebra, Suíça

O prédio residencial multifamiliar e comercial Caroubier (figura 17) fica na cidade de Genebra, Suíça, e tem uma área de 2.900m². O sistema consiste em 49 tubos enterrados de 0,125m de diâmetro, 50,0m de comprimento, 0,30m de distância entre eixos, enterrados a 0,50m sob o subsolo do estacionamento, totalizando 980m² de superfície de contato entre o ar nos tubos e a terra. Sua principal destinação é o aquecimento. O volume de ar no inverno varia entre 2.400m³/h e 3.000m³/h. A descarga final dos tubos, após circular pela edificação, é feita na garagem e tem efeitos positivos na renovação do ar desse ambiente. Com o uso do sistema, o custo da área aquecida ficou em 250Mj/m²/ano e a economia para refrigeração em 82Mj/m²/ano, fazendo com que o investimento tenha retorno em um ano de uso (HOLLMULLER; LACHAL, 2001 e HOLLMULLER, 2004).

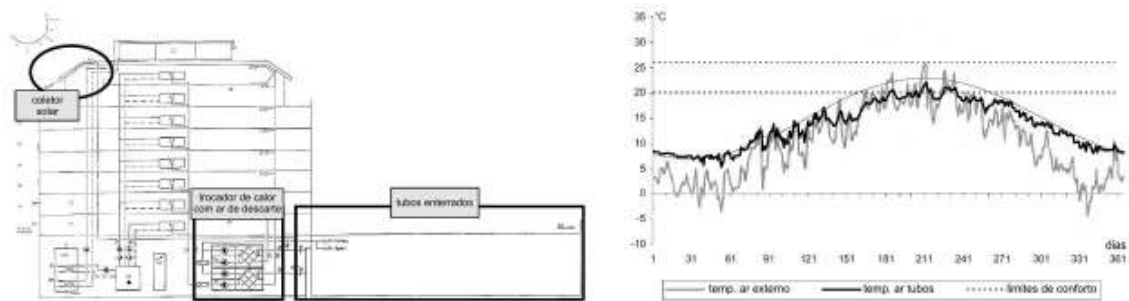


Figura 17: corte esquemático de funcionamento do sistema de dutos enterrados (esquerda) e gráfico de temperatura interna (direita) (fonte: HOLLMULER; LACHAL, 2004)

3 VENTILAÇÃO NATURAL DE HABITAÇÕES

Como descrito na ABNT (1980), ventilação é o processo de renovar o ar de um recinto. Frola e Schiffer (1988) complementam essa definição colocando que “a ventilação natural é o deslocamento do ar através do edifício, através de aberturas, umas funcionando como entrada e outras, como saída. (...) Ela proporciona a renovação do ar dos ambientes, sendo de grande importância para a higiene e (até certo ponto) para o conforto térmico de verão, em regiões de clima temperado e clima quente úmido”. O fluxo que entra ou sai do edifício depende da diferença de pressão entre os ambientes internos e externos, da resistência ao fluxo de ar oferecido pelas aberturas, pelas obstruções internas e por uma série de fatores relativos à incidência do vento e à forma do edifício (idem).

Além do período do ano, as exigências de ventilação também variam de acordo com as diferenças tipológicas e construtivas entre as edificações. Além disso, são dependentes, da finalidade de uso de cada compartimento, bem como com a quantidade de ocupantes e seus hábitos (fumar ou praticar exercícios, por exemplo). A ventilação deve ser controlada de forma a não gerar correntes de ar incômodas para os ocupantes e não incrementar desnecessariamente as perdas energéticas nos meses em que, por razões de conforto térmico, é necessário proceder o aquecimento das habitações. São relevantes as condições de temperatura no interior e no exterior das habitações para o estabelecimento das necessidades de ventilação e dos métodos a adotar (LNEC, 1994).

Uma vez que a utilização dos espaços é variada, de acordo com o período do dia, as normas técnicas de alguns países fazem diferenciação para a taxa de renovação de ar exigida para situação do ambiente em uso e do ambiente sem uso. Essa postura é favorável, principalmente, para situações onde a ação mecânica é imprescindível na ventilação, por permitir a redução do consumo energético. O Município de Porto Alegre, através do seu Código de Edificações (L.C. 289/92), permite a ventilação mecânica em lavabos (quando dotados exclusivamente de sanitários e lavatórios), em circulações, em garagens e em depósitos condominiais. O código, porém não deixar claro o número de renovações necessárias entre os períodos de uso e desuso, sendo o usual acionar o dispositivo de ventilação, juntamente com a chave de luz.

3.1 FINALIDADES DA VENTILAÇÃO

A maioria dos autores aborda a ventilação natural com duas funções básicas: a higiênica e a térmica. TOLEDO (2001), porém, subdivide a segunda função em outras duas partes: o conforto do usuário e a remoção do calor do ambiente. O primeiro critério, de ventilação dos ambientes, se baseia nos requisitos básicos de exigências humanas, tais como o oxigênio e o gás carbônico, além de desconcentrar odores corporais que podem causar náuseas, dores de cabeça e mal estar. Outra importante função da ventilação é a remoção do excesso de calor e de umidade dos ambientes e o terceiro fator é o conforto termo-higrométrico, com o incremento de trocas de calor por convecção e evaporação entre o corpo e o ar do recinto. Desta forma, a ventilação obedece a necessidades diferentes, já que a primeira tem que ser de caráter permanente e deve ser satisfeita em qualquer época do ano, enquanto as demais importam apenas quando o microclima interno é quente e o ar exterior tem uma temperatura menor que o interior.

Costa (1983) coloca que, no verão, quando o calor interno é maior que o externo e há grande concentração de pessoas e equipamentos, uma ventilação interna é necessária, mesmo que com o ar exterior não tratado. No inverno, a ventilação com o ar exterior não tratado é um ônus para o conforto térmico do ar interior da habitação e deve se restringir àquela necessária à manutenção das condições higiênicas do ambiente. Em ambos os casos, segundo o autor, o tratamento do ar de ventilação é sempre vantajoso. Ele pode ser feito ao natural (a) tomando-se o ar em microclima adequado (zonas arejadas, claras ou com vegetação intensa), (b) provocando, em climas secos, a umidificação adiabática parcial do ar ou (c) tomando o ar através de túneis, com uma elevada área de contacto com a terra (mais de $2\text{m}^2/\text{m}^3$ de habitação).

Note-se que é impossível assegurar, recorrendo exclusivamente a processos de ventilação natural, que a renovação de ar de projeto seja cumprida em qualquer instante considerado. Contudo, respeitando algumas recomendações mínimas, é de se esperar que as taxas de renovação de ar possam se aproximar das exigidas para um conjunto bastante abrangente de condições interiores e exteriores (LNEC, 1994).

3.1.1 Ventilação Higiênicas, Mínima ou de Inverno

Como descrito por alguns autores (FROTA e SCHIFFER, 1988 e GIVONI, 1976), a utilização corrente das habitações inclui atividades das quais resultam substâncias poluentes, cuja remoção é necessária para a existência de um ambiente adequado à permanência dos ocupantes ou para a realização das diversas atividades, garantindo o comburente necessário à realização de combustões completas. Para tanto, é necessário proceder a evacuação das substâncias poluentes e a admissão de ar limpo do exterior. Costa (1982) coloca que um ambiente é considerado salubre quando o ar que o mesmo contém apresenta propriedades físicas (pressão, temperatura, umidade e movimentação) e químicas tais que, possibilitem favoravelmente a vida em seu meio.

Essas substâncias (entre as quais se destacam o vapor d'água, o dióxido de carbono, o monóxido de carbono e os odores) resultam, principalmente, da atividade fisiológica humana, da combustão nos aparelhos termodomésticos, do uso de tabaco e de atividades domésticas, como a preparação dos alimentos, a lavagem e secagem de louça e de roupa e a utilização das instalações sanitárias. Essas substâncias podem afetar diretamente a permanência dos ocupantes pela sua toxicidade, nomeadamente o caso do monóxido de carbono, ou pelo incômodo, como é o caso dos odores (LNEC, 1994).

Os limites para as concentrações dessas substâncias variam de acordo com a sua toxicidade e com as características do uso do ambiente. Costa (1982) coloca que, caso o ar fosse totalmente substituído, os índices de troca seriam bem menores. A questão, entretanto, é que não ocorre a substituição e sim a diluição, pois o ar resultante da ventilação se mistura com o ar do ambiente e, assim, exige taxas maiores de renovação. Os valores correntemente mais aceitos são os indicados pela *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* de onde é derivada a NB-10 da ABNT (tabela 1).

Quando a umidade relativa do ar é elevada para além do desconforto que os ocupantes sentem, podem ocorrer condensações em locais cuja temperatura superficial se encontra abaixo do ponto de orvalho. A existência de água no estado líquido, depositada nas superfícies ou atingindo materiais higroscópicos, pode criar um meio propício ao desenvolvimento de fungos e de bolores, podendo resultar daí a danificação desses materiais ou a criação de um ambiente pouco saudável para a permanência dos ocupantes. Para o caso de vapor d'água, as

condensações serão evitadas, desde que não existam superfícies com temperaturas inferiores à de orvalho. A satisfação destes limites requer a renovação do ar do interior das habitações, dependendo a sua intensidade da massa de água que é libertada para o ar ambiente, por unidade de tempo (LNEC, 1994).

Tabela 1: índices de renovação de ar por pessoa para cada tipo de ambiente (fonte: NB-10 da ABNT)

Local	m ³ por pessoa		percentagem de pessoas fumando
	preferível	mínima	
Apartamentos	35	25	Baixa
Bancos	25	17	Baixa
Barbearias	25	17	Baixa
Bares	35	25	30%
Escritórios (geral)	25	17	Baixa
Estúdios	35	25	0
Lojas	13	8	0
Quartos (hospitais)	25	17	Baixa
Quartos (hotéis)	25	17	Baixa
Residências	35	25	Baixa
Restaurantes	35	25	25%
Salas de diretores	50	40	100%
Salas de operações (hospitais)	-	-	0
Teatros, cinemas, auditórios	12	10	0
Salas de aula	50	40	0
Sala de reunião	35	25	Baixa

A tabela 2 ilustra a produção de dióxido de carbono e de vapor d'água na queima de combustíveis decorrentes da utilização doméstica. A tabela 3 ilustra a liberação de calor e a produção de dióxido de carbono e de vapor d'água devido ao metabolismo dos seres humanos em função da intensidade da atividade desenvolvida (LNEC, 1994).

Este tipo de ventilação deve ser geral e permanente, mesmo durante os períodos em que as temperaturas exteriores obrigam a manter as janelas fechadas. Para tanto, é necessário prever

aberturas, através da envoltória do edifício e dos limites internos dos diversos espaços, funcionando permanentemente. Essas aberturas podem estar providas de dispositivos de regulação, que permitam o controle das taxas de renovação de ar e não inibam a ventilação na totalidade. Entende-se por *índice de renovação do ar* a relação entre o volume de ar que penetra no ambiente, por hora, e o volume do mesmo.

Tabela 2: produção de dióxido de carbono e de vapor de água na combustão (fonte: LNEC, 1994)

Combustível	Vapor de água (g/h por kW)	Dióxido de Carbono (L/s por kW)
Gás natural	150	0,027
GPL	130	0,033
Querosene	100	0,034
Coque	30	0,048
Antracito	10	0,048

Tabela 3: liberação de calor e produção de dióxido de carbono e de vapor de água no metabolismo humano (LNEC, 1994)

Atividade	Metabolismo (W)	Dióxido de Carbono (L/s)	Vapor de água (g/h)
Repouso	100	0,0040	40
Trabalho leve	160 a 320	0,0064 a 0,0128	50
Trabalho moderado	320 a 480	0,0128 a 0,0192	50
Trabalho pesado	480 a 650	0,0192 a 0,0260	50
Trabalho muito pesado	650 a 800	0,0260 a 0,0320	50

Embora, de maneira geral, todos os elementos que constituem a envoltória do edifício sejam permeáveis ao ar, devido à existência de juntas ou de fendas, estas pequenas aberturas não são adequadas para efeito de ventilação. As infiltrações ou extrações que por aí ocorrem são difíceis de controlar e podem produzir nichos de ar parado que provocam distúrbios nos esquemas de ventilação. Essas infiltrações devem ser, todavia, consideradas sob o ponto de vista de conservação de energia, pois seu valor não pode ser negligenciado (LNEC, 1994).

3.1.2 Ventilação Térmica ou de Verão

Como descrito por Rivero (1985), quando, além da ventilação necessária para a respiração, deseja-se melhorar as condições de conforto térmico do ambiente, é necessário taxas de renovação de ar bem maiores do que as recomendadas para assegurar a qualidade do ar respirável. O mesmo autor coloca que este benefício deve se estender a todos os elementos que compõem o espaço interior, como os fechamentos e os móveis, que são sempre grandes depósitos de calor.

Costa (1983) coloca que o resfriamento do edifício por ventilação, na estação quente, é desejável apenas quando os ganhos de temperatura (somatório dos ganhos internos e externos) elevam a temperatura acima da temperatura exterior. Mascaró et alli (2001) complementa que em climas quentes e úmidos o efeito do vento sobre as superfícies é desejável e favorece o resfriamento, uma vez que estas superfícies estão frequentemente úmidas e tendem a resfriar mais facilmente devido à evaporação.

Segundo Frota e Schiffer (1988) a carga térmica transferida pela ventilação será:

$$Q_{vent} = 0,35.N.V.\Delta t \quad (\text{equação 1})$$

Onde “N” é o número de renovações por hora, “V” é a velocidade do vento externo ou incidente nas fachadas em m/s, “ Δt ” é a diferença de temperatura entre o ar interno e o externo em °C.

É importante observar que existem limites para a velocidade de circulação de ar dentro do ambiente. A não-observação desse parâmetro pode causar sério desconforto, como mencionado pela ASHRAE (2001). De acordo com a ABNT (NB-10), a velocidade do ar na zona de ocupação, isto é, no espaço compreendido entre o piso e o nível de 1,5m, deve ficar compreendida entre 0,025m/s e 0,25m/s, se constante. Excepcionalmente, será permitido ultrapassar esses limites na vizinhança das grelhas de retorno e de insuflamento que, por necessidade de construção, forem localizadas abaixo do nível de 1,50m e no espaço normalmente ocupado por pessoas.

3.1.3 O Efeito da Ventilação no Conforto Térmico

A velocidade do vento é uma variável determinante no conforto térmico que influencia diretamente na quantidade de calor transmitido por convecção. Ela é referenciada nos índices de conforto – tanto biofísicos quanto fisiológicos e subjetivos – como uma estratégia para situações onde a temperatura está (até certo ponto) acima da situação de conforto (TOLEDO, 2001). Segundo Mascaró et alli (2001), ela é a única variável de conforto capaz de reduzir o estresse térmico gerado pela alta temperatura associada à alta umidade.

Toledo (2001) observa que a legislação brasileira estabelece valores de taxas de renovação de ar apenas para ambientes climatizados artificialmente, não havendo similar para os naturalmente ventilados. Porém, a influência da velocidade do vento sobre o conforto já foi estudada por inúmeros autores, que apresentam recomendações bioclimáticas, tanto no espaço urbano, quanto para o interior edificado, sobretudo em climas quentes e úmidos. Entre eles podemos destacar Olgyay (1998), Givoni (1976, 1992), Mascaró et alli (2001), Rivero (1985) e Lamberts e Xavier. (2002).

Estes estudos demonstram que, para climas tropicais, em edifícios naturalmente ventilados e para indivíduos adaptados ao calor, há uma tolerância maior às variáveis térmicas e, nesse caso, os limites de conforto estabelecidos podem ser significativamente ampliados (GIVONI, 1992). Lamberts et alli (2004) apresentam as estratégias construtivas propostas por GIVONI (1976), adaptadas para a situação de países em desenvolvimento – onde os edifícios não apresentam condicionamento do ar e a reação à variação do clima externo é mais assimilada pelo usuário. Na Carta Bioclimática proposta, a zona de conforto é apresentada entre os limites de 18°C e 26°C, para umidade relativa do ar de 80%, sendo ampliada para 29°C, para umidade de 50%. Nela são apresentadas seis estratégias bioclimáticas para corrigir as condições de conforto térmico e duas estratégias artificiais. Segundo a carta, a ventilação natural se aplica para situações onde a temperatura do ar ultrapassa os 29°C ou a umidade relativa do ar for superior a 80%, até um limite de temperatura do ar exterior de 32°C.

Mascaró et alli (2001) afirma que, em condições quentes e úmidas, a velocidade do ar é tão importante quanto o volume de ar por pessoa. Mesmo com pequenas diferenças de temperatura entre o ar interior e o exterior, a ventilação natural poderá reduzir a excessiva umidade do interior e proporcionar conforto térmico aos seus usuários, através do aumento das trocas de

calor pela convecção, com a evaporação do suor. A tabela 4 apresenta esta afirmação de forma numérica, com a sensação subjetiva e térmica causada no usuário. Como observado na mesma tabela, e descrito pela ASHRAE (2001), a velocidade do ar apresenta um limite máximo aceitável pelo usuário da edificação a extrapolação de tal limite é apontado como um fator de extremo desconforto.

Tabela 4: efeito da velocidade do vento sobre o usuário e influência na sensação térmica (fonte: EVANS; SCHILLER, 1994)

Velocidade do ar (m/s)	Efeito sobre o usuário	Redução aparente na temperatura (°C)
0,1	Falta de ventilação	0,0
0,25	Significante só quando as temperaturas são baixas	0,7
0,5	Refrescante	1,2
1,0	Confortável, mas sempre o movimento do ar é notado. Máxima velocidade do ar à noite	2,2
1,5	Máxima velocidade do ar dentro da edificação	3,3
2,0	Aceitável apenas sob condições de alta umidade e temperatura.	4,2

3.2 TIPOS DE VENTILAÇÃO

Frota e Schiffer (1988), entre outros autores, colocam que a ventilação natural ocorre pela diferença de pressão exercida pelo ar sobre um edifício, pelo vento externo, ou pela diferença de densidade do ar, por ação da temperatura. A força dos ventos promove a movimentação do ar através do ambiente, produzindo a ventilação denominada ação dos ventos. O efeito da diferença de densidade provoca o chamado efeito chaminé. Quando a ventilação natural de um edifício é criteriosamente estudada, verifica-se a conjugação dos dois processos. No entanto, sua simultaneidade pode resultar em um somatório de forças ou fazer com que ajam em contraposição e prejudiquem a ventilação dos ambientes.

O aquecimento do interior dos edifícios, que decorre das atividades aí desenvolvidas, dos ganhos solares através dos vãos envidraçados e do funcionamento dos aparelhos de aquecimen-

to, intensifica a ação da ventilação e tem um papel fundamental em situações climáticas de inverno. Quando a temperatura exterior é muito elevada, pelo contrário, é indesejável que a temperatura no interior das habitações seja ainda mais elevada, sendo, portanto, conveniente intensificar a ventilação por ação do vento para evitar o sobre-aquecimento. Em qualquer das situações, é posta em evidência a necessidade de realizar de forma controlada a ventilação dos edifícios de habitação, sob pena de serem criadas condições inadequadas à permanência de pessoas (LNEC, 1994).

3.2.1 Ventilação por Diferença de Densidade ou Efeito Chaminé

O efeito chaminé resulta da diferença de pressão originada da diferença de temperatura ou do ar interno e externo ao edifício ou das massas de ar junto ao piso e junto ao forro. Os ganhos de calor a que o edifício está submetido ocasionam a elevação da temperatura do ar contido em seu interior, que se torna menos denso e ascende. Se o recinto dispuser de aberturas próximas ao piso e ao teto, o ar interno (por estar mais aquecido que o externo) tenderá a sair pelas aberturas superiores e entrar pelas inferiores. O fluxo de ar será mais intenso quanto maior for essa diferença de alturas (entre as aberturas) ou de temperatura (LNEC, 1994).

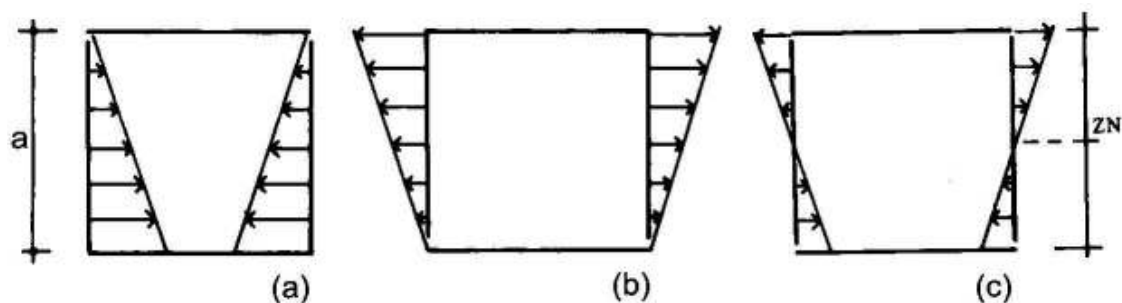


Figura 18: croquis explicativos das distribuições de pressões em uma caixa cúbica de aresta “a” (fonte: FROTA; SCHIFFER, 1988)

O fenômeno de deslocamento de ar por efeito chaminé é freqüentemente exemplificado através de uma caixa cúbica de aresta “a”, cuja temperatura interna é maior que a externa. A figura 18 demonstra as resultantes da pressão para caso exista uma abertura nas paredes, junto (a) a base da caixa, (b) ao topo da caixa e (c) em ambas as posições. No primeiro caso, o interior estará em estado de subpressão ou rarefação, enquanto no segundo em sobrepressão ou com-

pressão. A terceira situação ocasionará um efeito combinado das duas anteriores, com sobrepressão na região inferior e subpressão na superior. Nessa condição, o ar penetra no cubo pelo rasgo inferior e sai do cubo pelo rasgo superior. A linha que dá a passagem da região de rarefação para a de compressão representa a zona neutra, onde a diferença de pressão entre o interior e o exterior é nula. Uma pequena abertura realizada nessa altura não ocasionará fluxo de ar (FROTA; SCHIFFER, 1988).

Existem duas fórmulas básicas para cálculo do fluxo de ar por efeito chaminé. Na primeira, admite-se uma temperatura média do ar externo e interno e é válida para casos mais gerais, como escolas e habitações, e exclui situações de grande produção de calor interno (equação 2). A segunda pode ser empregada na generalidade dos casos em que se conhece a diferença de temperatura do ar próximo ao piso e ao forro (equação 3) (FROTA; SCHIFFER, 1988 e COSTA, 1982).

$$\Phi_c = 0,128.A\sqrt{H(t_i - t_e)}.I \quad (\text{Equação 2})$$

$$\Phi_c = \sqrt{\frac{2g.H(T_s - T_b)}{\sum \lambda_1.T_b}} \quad (\text{Equação 3})$$

Em ambas, “ Φ_c ” é o fluxo de ar por de diferença de temperatura, “A” é a menor área de entrada ou saída do ar, “H” é a diferença de altura, “ t_i ” é a temperatura do ar interno médio, “ t_e ” é a temperatura do ar externo médio, “I” é o incremento da vazão causado pelo excesso de área de uma abertura em relação à outra, “g” é a aceleração da gravidade, “ T_s ” é a temperatura junto à base, “ T_b ” é a temperatura junto ao topo e “ $\sum \lambda_1$ ” é o somatório das resistências.

Salienta-se que os processos de ventilação natural estão inteiramente dependentes do delicado balanço das ações promovidas pela pressão do vento e pela diferença de temperatura (quando não são implementados quaisquer dispositivos mecânicos de ventilação forçada). Considera-se, no entanto, que a ação térmica só poderá promover uma ventilação eficaz quando a temperatura média no interior do edifício apresentar, em relação à temperatura exterior, um diferencial superior a 8°C. Isto implica que esta solução seja normalmente levada em consideração

em situações de inverno. Nos restantes períodos do ano, admite-se que seja a ação do vento a garantir, em regra, a renovação do ar no interior dos edifícios (LNEC, 1994).

3.2.2 Ventilação pela Ação dos Ventos

Como colocado por Frota e Schiffer (1988), a diferença de pressões exercida sobre o edifício é causada pela ação dos ventos. O vento, ao encontrar um obstáculo, no caso um edifício, desvia e tende a retornar em seu trajeto normal após transposto o obstáculo. Com demonstra a figura 19, as paredes expostas ao vento estarão sujeitas a pressões positivas ou sobrepressões, enquanto as não expostas, incluindo a cobertura, a pressões negativas ou subpressões. Deste modo, esse tipo de ventilação pode ser intensificado por meio de aberturas dispostas convenientemente, ou seja, a abertura de vãos em paredes sujeitas a pressões positivas, para a entrada de ar, e negativas, para sua saída.

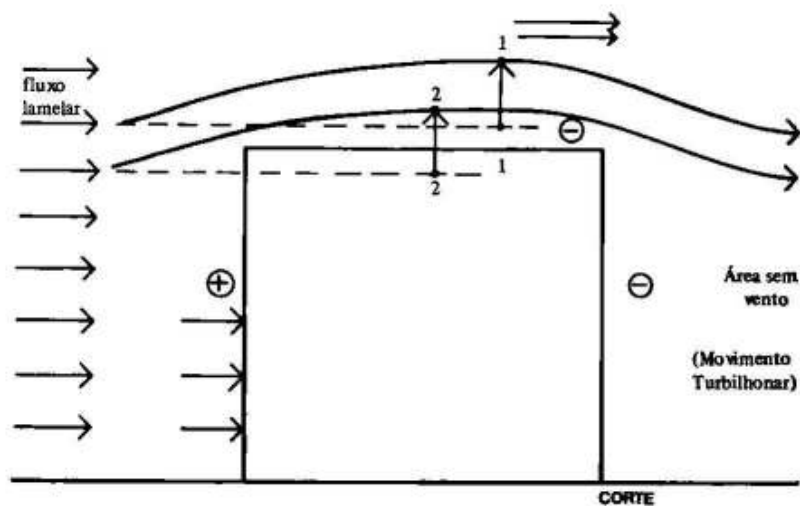


Figura 19: exemplo da distribuição da pressão na ventilação por ação dos ventos (fonte: FROTA; SCHIFFER, 1988)

A distribuição das pressões sobre o edifício depende da direção dos ventos com relação ao edifício e do fato de ele estar exposto às correntes de ar ou protegido por outro edifício ou obstáculo. Diferenças de pressão da ordem de $0,05\text{mm}_{\text{H}_2\text{O}}$ já são suficientes para causar cor-

rentes de ar apreciáveis, desde que haja caminho para as mesmas. O fluxo da ventilação, devido à diferença de pressão nas fachadas, pode ser expresso pela vazão ou pela velocidade do vento como mostram as expressões abaixo (FROTA; SCHIFFER, 1988 e RIVEIRO, 1985):

$$\Phi_v = c_a \cdot A_o \cdot v \sqrt{(c_e - c_s)} \quad (\text{Equação 4})$$

$$\frac{1}{A_o^2} = \frac{1}{A_e^2} + \frac{1}{A_s^2} \quad (\text{Equação 5})$$

$$V_a = A_e \cdot F \cdot V \quad (\text{Equação 6})$$

Onde “ Φ_v ” é o fluxo ou vazão de ar pela ação dos ventos (m³/s), “ c_a ” é o coeficiente de perda de carga pela ação do vento (0,6), “ v ” é a velocidade do vento externo resultante na abertura (m/s), “ c_e ” é o coeficiente de pressão na abertura de entrada de ar, “ c_s ” é o coeficiente de pressão da abertura de saída de ar, “ A_o ” é a área equivalente das aberturas (m²), “ A_e ” é a área da abertura de entrada (m²), “ A_s ” é a área da abertura de saída (m²). “ V_a ” é o volume de ar renovado, “ A_e ” é a área da abertura onde entra o ar, “ A_s ” é a área de abertura onde sai o ar, “ F ” é um valor que depende da relação, conforme a tabela 5. No caso do vento não ser normal à abertura, deve-se multiplicar a velocidade do vento externo com o cosseno do ângulo de incidência.

Tabela 5: determinação do incremento de vazão causado pela razão das áreas de abertura (fonte: Frota e Schiffer, 1988)

As/Ae	F	As/Ae	F	As/Ae	F	As/Ae	F
0,25	210	0,75	510	2	760	4	825
0,5	380	1	600	3	805	5	835

Ao se lidar com edificações na área urbana, a ventilação por ação dos ventos tende a ser reduzida em relação a locais com edificações distanciadas, pois o fluxo do vento nas ruas tende a ser no sentido das ruas paralelo às fachadas. É necessário considerar, também, que obstáculos produzidos por edificações vizinhas, muros ou até mesmo a vegetação podem interferir neste

sentido, modificando as pressões do ar sobre as superfícies externas (MASCARÓ et alli, 2001).

É necessário observar os possíveis sentidos do fluxo de ar no interior das edificações, pois, para que a circulação de ar seja realizada, é necessário que sejam previstas aberturas de comunicação permanentes no interior da habitação, que permitam a livre movimentação do ar. As aberturas consideradas devem ter seções de passagem compatíveis com as massas de ar em circulação (LNEC, 1994).

Os esquemas de ventilação podem ser conjuntos de toda a habitação ou por setores. Em qualquer caso, se coexistirem, no mesmo setor, compartimentos principais e de serviço, é preferível que o sentido do fluxo de ar corresponda à entrada de ar exterior nos compartimentos principais e à saída de ar viciado pelos compartimentos de serviço. O estabelecimento deste sentido de circulação do ar destina-se a evitar a contaminação dos compartimentos principais com poluentes, vapor de água e odores, que são gerados nos compartimentos de serviço. Para tanto, é necessária uma boa orientação das aberturas aos ventos (LNEC, 1994).

O fato de as ações que promovem este tipo de ventilação não serem muitas vezes passíveis de controle direto implica que, para situações particulares de ocupação ou para alguns locais enclausurados, seja recomendável o recurso de ventilação mecânica (LNEC, 1994).

4 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO VENTURA, DA SUA ENVOLTÓRIA E DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE TUBOS ENTERRADOS

Este capítulo apresenta uma descrição do Protótipo Ventura construído através da parceria entre o NORIE/UFRGS e o grupo SAMPAR na unidade de negócios Vila Ventura ($30^{\circ}07'07''\text{S}$; $51^{\circ}01'52''\text{O}$) à qual o acesso desde Porto Alegre é demonstrado na figura 20. É descrito também o clima local, a área de implantação, as estratégias bioclimáticas adotadas e o funcionamento do sistema de tubos enterrados.

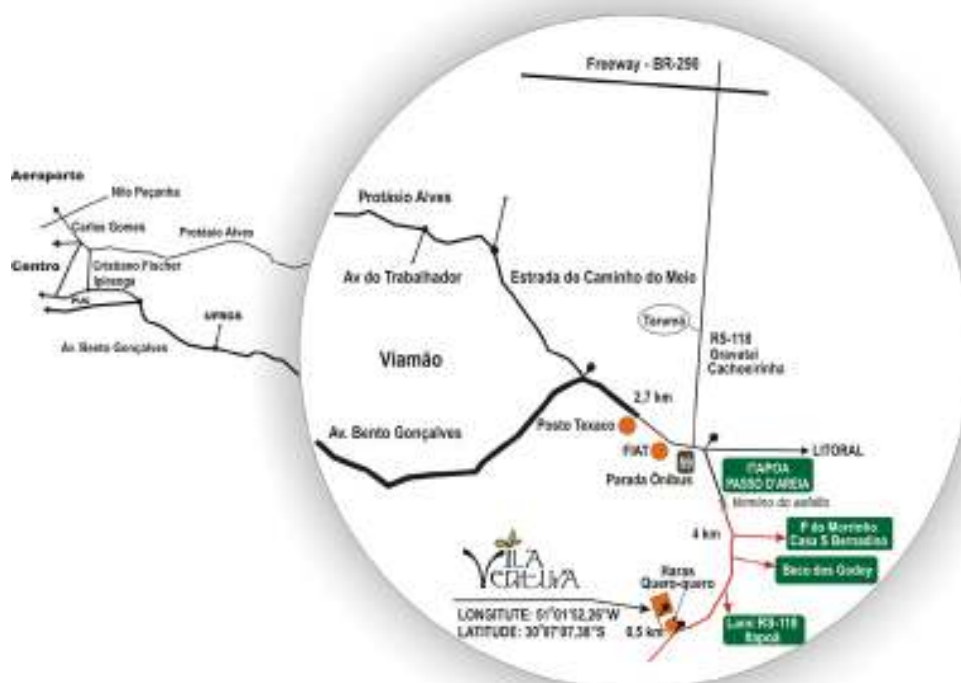


Figura 20: mapa de localização do Vila Ventura (fonte: VILA VENTURA, 200-)

Através deste conhecimento, pode-se descrever como o sistema de tubos atua e justificar como o sistema mantém a temperatura interna em valores bem abaixo da temperatura ambiente. As informações foram extraídas de visitas semanais ao canteiro, do memorial descritivo exe-

cutado pelo empreiteiro Arno Stein e em entrevistas com os projetistas: o Arquiteto Pery Bennet e o Engenheiro Mecânico e Civil Joaquim Vaz.

4.1 BREVE CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DO ESTADO E DA CIDADE DE VIAMÃO

O clima afeta a execução, a segurança, o conforto e o desempenho de edificações (GOU-LART, 1993). Sendo assim, o estudo do clima é imprescindível para que se possa avaliar com coerência o comportamento térmico do sistema de dutos enterrados estudados nesse trabalho. Considera-se importante apresentar as características climáticas globais, a fim de poder compará-las com o seu comportamento peculiar ocorrido no local e no período em que foi executado o estudo.

A maior fonte de dados da cidade de Viamão, com séries históricas, foi executada pela Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul (FEPAGRO/RS) no período entre março de 1980 e setembro de 1988². Os valores registrados de temperatura do ar ambiente foram analisados por Vaz e Sattler (2004) e mostram temperatura média de 18,4°C, as temperaturas médias das mínimas e das máximas com distribuição senoidal, oscilando em torno de 12,3°C e 24,5°C, respectivamente, com uma variação anual da temperatura do ar entre os limites médios de 8,9°C e 30,0°C.

Provavelmente por não haver registros de tal natureza, os referidos autores não fazem menção, em seus estudos, sobre o comportamento da umidade relativa do ar nem sobre o regime de ventos no período. Por esse motivo, aliado à falta de registro por períodos mais longos, o clima da cidade de Viamão é constantemente classificado com os dados coletados na estação meteorológica mais próxima, que corresponde ao 8º Distrito de Meteorologia, localizado em Porto Alegre.

² Medidas relativas à 50cm E 1m de altura, em ambiente sem obstáculos às 12h, 18h e 24h

Segundo o sistema de Köppen, a cidade de Viamão se enquadra na zona fundamental temperada, ou "C", e no tipo fundamental "Cf", ou temperado úmido. No Estado, esse tipo "Cf" se subdivide nas variedades "Cfa" e "Cfb". A segunda se restringe ao planalto basáltico superior e ao escudo Sul-Rio-Grandense, enquanto que as demais áreas pertencem à variedade "a" (MORENO, 1961) – que inclui a capital juntamente com a cidade de Viamão.

A variedade "Cfa" se caracteriza por apresentar chuvas durante todos os meses do ano e possuir a temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, e a do mês mais frio superior a 3°C. A variedade "Cfb" apresenta características similares a anterior, porém, a temperatura do mês mais quente é inferior a 22°C.

Segundo NIMER (1990), no Sul do Brasil, a temperatura média exerce um papel de uniformizadora da classificação do clima regional. Isto não significa que os valores e o comportamento da temperatura sejam semelhantes, mas apenas que há uma relativa semelhança que impede a determinação de áreas intra-regionais muito distintas, diferente do verificado em outras regiões geográficas do Brasil.

O mesmo autor coloca que a média anual da temperatura é ao redor de 18°C na totalidade do Estado, caracterizando isoterms típicas da Zona Temperada com distribuição estreitamente condicionada à latitude, maritimidade (posição em relação a massas d'água) e, principalmente, ao relevo. As médias anuais de temperatura mais elevadas são registradas nas regiões mais próximas ao nível do mar e diminuem gradativamente com o aumento da altitude, chegando a 16°C nas regiões mais altas.

Esta classificação pela temperatura média não demonstra a variação térmica anual que ocorre ao longo do ano na capital e arredores, visto que, durante o solstício de verão, a pequena inclinação dos raios solares acarreta na ocorrência de forte calor com registros de temperaturas durante o dia de até 40°C, com valores médios de 24,3°C. Da mesma forma, o inverno é, na sua maior parte, acentuado em virtude do balizamento intertropical da marcha zenital do sol. Nos meses entre maio e agosto, a temperatura média se mantém relativamente baixa em toda a Região Sul, e a cidade de Porto Alegre registra valores médios de 14,7°C (FERRARO E HASENACK, 2000). Neste período, todo o estado sente os efeitos típicos do inverno em função das sucessivas e intensas invasões de frentes polares. Essas frentes trazem abundantes chuvas acompanhadas de forte queda de temperatura, com valores comumente atingindo registros inferiores a 0°C e tornando notável a ocorrência de geadas.

Quanto à curva diária de temperatura na cidade de Porto Alegre, Uber (1992) coloca que os valores máximos de temperatura do ar ocorrem, normalmente, por volta das 15 horas, enquanto os mínimos ocorrem cerca das 6 horas da manhã. Nos quatro meses de medição junto ao Protótipo Ventura, no verão, se constatou que esse ciclo e esses horários também são representativos do microclima local.

Segundo NIMER (1990), no Rio Grande do Sul, o valor de umidade relativa do ar é muito elevado, pois varia, em média, de 75% a 85%. No verão e primavera, os valores giram em torno de 68% a 85%, enquanto no outono e inverno estes se encontram entre 76% e 90%. Esses registros demonstram relativa estabilidade durante as diferentes estações do ano. Na capital e cidades limítrofes, a localização na faixa litorânea norte do estado, a aproximadamente 100Km da costa do Oceano Atlântico, e muito próxima às margens do lago Guaíba, confere ao município uma elevada umidade relativa devido à evaporação natural, ficando as faixas de abrangência muito próximas à média do estado.

A precipitação no Sul do Brasil se apresenta, segundo NIMER (1990), com distribuição espacial uniforme, com precipitação anual variando de 1.250mm a 2.000mm, ao longo de quase todo seu território. Portanto, não há, no Rio Grande do Sul, nenhum lugar caracterizado por carência de chuva. Para o autor, tal efeito se deve ao relevo apresentar características gerais suaves, de modo a não criar diferenciações importantes na distribuição pluviométrica anual. As chuvas também ocorrem bem distribuídas durante todos os meses do ano como apontado por MOTA et alli (1971). Embora existam casos extremos registrados, no qual alguns meses registram mais de 400mm de pluviosidade, enquanto outros apresentaram valores inferiores a 1mm, a amplitude de variação entre os meses de máxima e mínima não chega a ser significativa para caracterizar o clima como tendo um período chuvoso e outro seco.

Quanto ao regime de ventos, MOTA et alli (1971) colocam que o Estado se encontra na zona subtropical de alta pressão, justamente na faixa divisória de influência dos eventos alísios e ventos de oeste. Esta posição implicaria que, na metade norte do Estado dominassem os ventos alísios (do mar para o continente) e na metade sul, ventos de oeste (do continente para o mar). Entretanto, esse comportamento não se verifica, uma vez que há predominância dos ventos de leste e sudeste, tanto no Estado quanto em Porto Alegre, durante todo o ano, devido a fenômenos de alta e baixa pressão. Ventos predominantes entre os quadrantes oeste e leste ocorrem apenas nos primeiros meses de inverno com ocorrência de baixas velocidades.

Ocorre uma série de ventos, provenientes de diferentes zonas do globo, que afetam o clima do estado. De acordo com NIMER (1990), da zona depressionária subantártica partem os anticiclones polares, que periodicamente invadem o continente sul-americano, com ventos de oeste a sudoeste nas altas latitudes, e adquirem a direção sul a sudeste, ao se aproximar do trópico, no território brasileiro. Embora, em sua origem, estes anticiclones apresentem ar seco, frio e estável, em sua trajetória eles absorvem calor e umidade da superfície morna do mar. Sendo assim, no verão são eles os principais responsáveis pelas abundantes precipitações que ocorrem no Sul, dentre as quais os aguaceiros de grande concentração.

O mesmo autor coloca que, a partir meados da primavera até meados de outubro, todo o território intertropical brasileiro é, periodicamente, invadido por sucessivas ondas de ventos de oeste a noroeste trazidas por linhas de instabilidades tropicais. Esses ventos são provindos de depressões barométricas alongadas. No interior desta linha de instabilidade tropical, o ar apresenta convergência dinâmica e acarreta, geralmente, em chuvas (e por vezes granizo), trovoadas e ventos de moderados a fortes (com rajadas que atingem de 60km/h a 90km/h).

Tal fenômeno também ocorre, e com maior frequência, no verão, quando há um decréscimo geral da pressão, motivado pelo forte aquecimento do interior do continente. À medida que a frente polar caminha para o Equador, as instabilidades tropicais se deslocam para leste ou, mais comumente, para sudeste, acumulando-se com nuvens pesadas e geralmente acarretando em chuvas tipicamente tropicais. Tais chuvas se verificam, principalmente, no final da tarde ou início da noite e constituem as chamadas chuvas de verão, que, ao contrário das chuvas frontais, duram poucos minutos, raramente ultrapassando uma hora.

Em Porto Alegre, a velocidade dos ventos, em termos médios, é baixa, com valores de aproximadamente 1m/s durante os meses de inverno e 2,3m/s no final da primavera e todo o verão. Os demais meses são considerados por Aroztegui (1977) como meses de transição. Ferraro e Hasenack (2000) colocam que, embora a velocidade média seja baixa, eventualmente podem ocorrer rajadas que atingem valores muito superiores aos padrões médios, principalmente no outono e primavera.

O ciclo diário de oscilação da velocidade do vento para a cidade de Porto Alegre foi descrito por Uber (1992). Ela coloca que “observa-se uma tendência diária, que persiste ao longo de todo o período anual, de ocorrer uma queda na velocidade do vento pela madrugada e manhã, havendo, após, um incremento que atinge seu pico máximo entre o fim da tarde e início da

noite, quanto volta a decrescer.” A mesma autora coloca que “o que varia durante o ano é a amplitude entre os valores máximos e mínimos, que atinge seu maior valor entre os meses de dezembro e janeiro e o menor entre junho e julho”.

4.2 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO VENTURA

Como descrito na introdução, o processo de desenvolvimento do Protótipo “Ventura” teve início na demanda do empresário Samuel da Silveira do Grupo SAMPAR na busca do desenvolvimento de construções e sistemas mais sustentáveis para sua Unidade de Negócios Vila Ventura e no interesse e disponibilidade do Prof. Miguel Sattler, do NORIE, em atingir tais metas em sua disciplina. Deste conjunto de experiências, surgiu o vínculo público-privado que culminou, após o projeto, na construção da edificação.

O prédio do Protótipo Ventura (figura 21) foi projetado de acordo com os princípios da arquitetura bioclimática e sustentável. Desta forma, foi empregado sistemas passivos diretos e indiretos de controle de temperatura e materiais de baixo impacto ambiental e/ou selecionados dos já existentes no depósito da empresa. Embora tenham ocorrido modificações no projeto e na especificação dos materiais durante a execução da obra, essas diretrizes básicas estabelecidas nas fases de projeto foram mantidas. Outra premissa foi a utilização de mão-de-obra local, uma vez que existe um corpo de obras permanente no empreendimento.

O sistema de tubos enterrados proposto foi dimensionado seguindo algumas recomendações básicas da bibliografia para a instalação. O sistema desenvolvido consiste em dois feixes de dutos enterrados no solo com inclinações diferentes, um ascendente e outro descendente em relação à edificação. A convecção gerada pela diferença de temperatura no duto, no ambiente e na chaminé solar, bem como o efeito do vento sobre o conjunto gera a movimentação do ar no interior dos tubos que então renova o ar do ambiente.

O entusiasmo inicial do empresário, porém, diminuiu com o tempo e a mão-de-obra dedicada a finalizar a obra foi relocada para outras construções mais urgentes do ponto de vista dos sócios. Desta forma, a obra que estava programada para ser finalizada no final de mês de fevereiro apresentava condições mínimas de ser monitorada apenas no dia 20 de outubro de 2005.



Figura 21: foto externa da fachada norte do Protótipo Ventura

A edificação foi construída junto ao talude natural do terreno, integrando-se à topografia e tirando proveito da inércia térmica do solo. A vegetação local foi observada para que não ocorressem cortes ou gerassem sombreamento excessivo. Ao leste da edificação existe um bambuzal, que se desenvolve linearmente sobre o eixo norte sul, como visto na figura 22.

A edificação, de pavimento único, possui uma área útil de 45m^2 , dividindo-se em uma sala de aula de 36m^2 , uma administração de $4,5\text{m}^2$ e sanitários de $4,5\text{m}^2$. Foi projetada com o objetivo de melhorar o conforto térmico ao longo do ano. É conhecido o fato de que na latitude de Viçosa a fachada norte recebe mais radiação solar no inverno e menos durante o verão. Desta forma, o prédio foi construído ao longo do eixo leste-oeste, dispondo uma grande quantidade de área de janelas para o norte. A forma adotada permite a entrada de luz e radiação solar no interior do prédio, durante o inverno, quando ocorrem as menores altitudes solares, e impede a sua entrada no verão, através do beiral do telhado projetado para este fim.

A distribuição dos ambientes internos leva em consideração o tempo de ocupação das salas. Os locais de serviço estão localizados nas extremidades, a fim de servirem de isolamento adicional, enquanto as de uso mais constante estão no centro.

Em virtude da primeira utilização da edificação ser para o experimento, as janelas foram construídas fixas. Elas, porém, foram localizadas nas paredes norte e sul possibilitando que, caso desejado, possam ser substituídas por outras, do tipo móvel, e permitir a ventilação cruzada. A disposição dos ambientes, as dimensões internas com pé-direito e a localização das aberturas são apresentadas na figura 23.

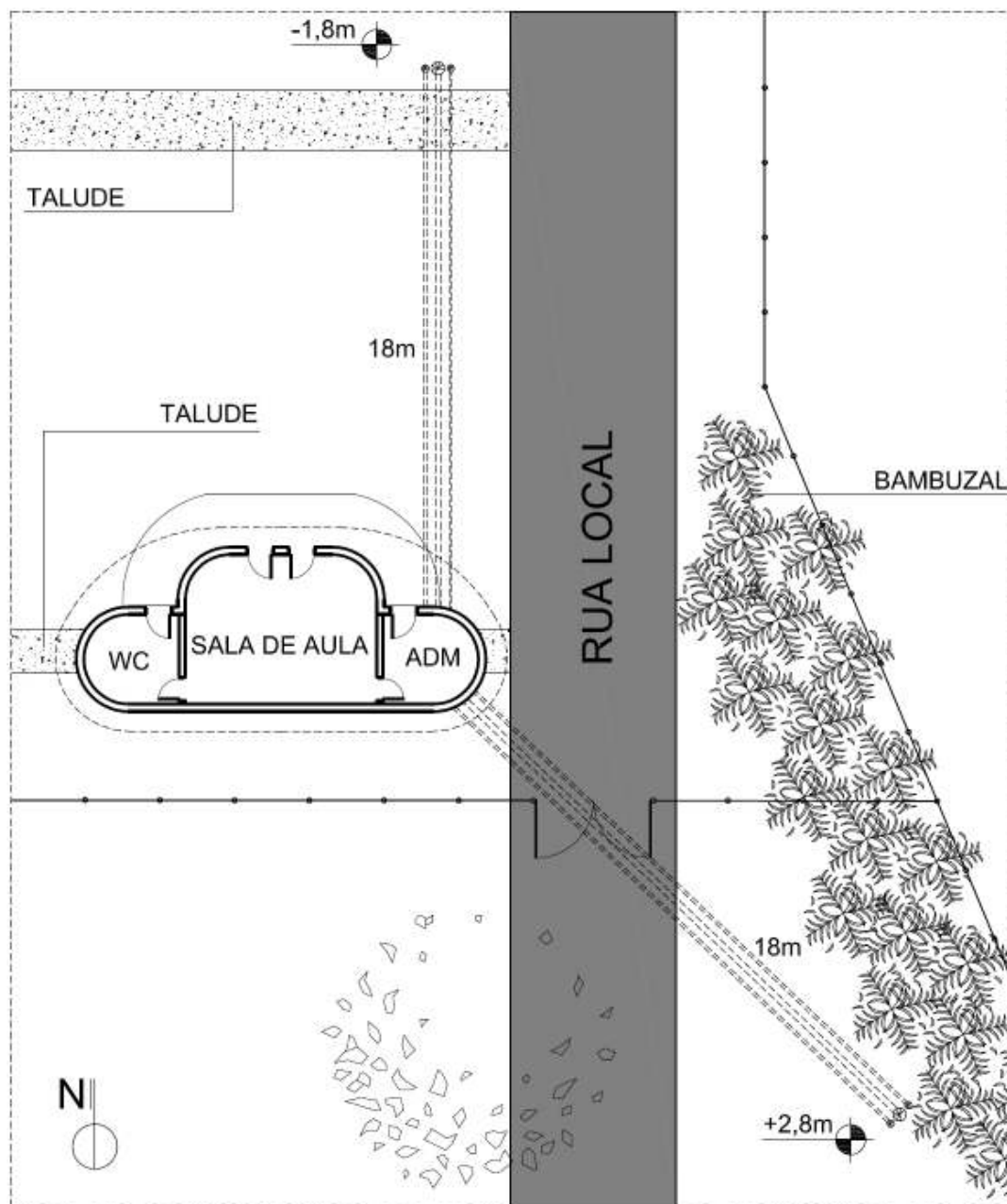


Figura 22: implantação do Protótipo Ventura

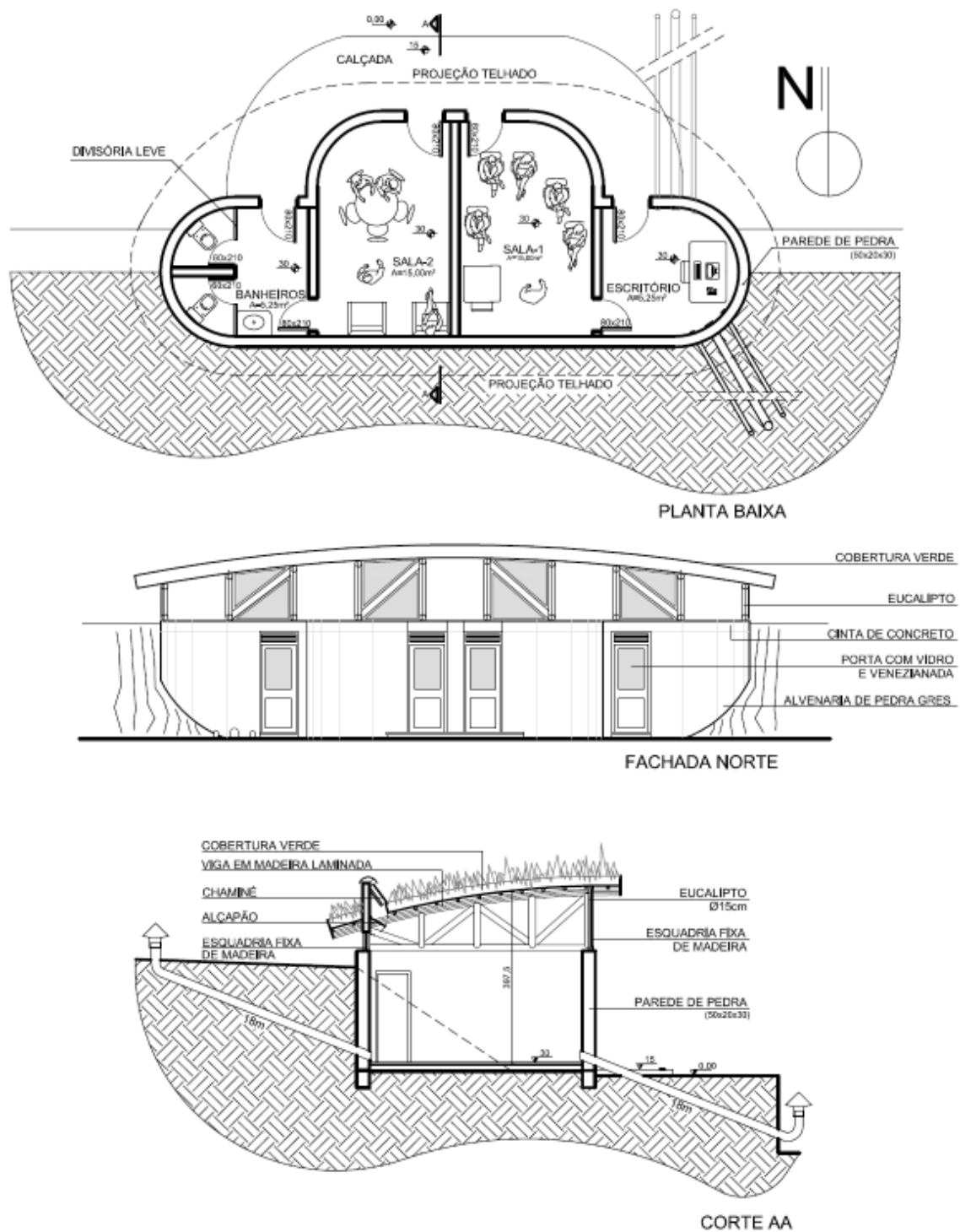


Figura 23: planta baixa, fachada norte e corte AA do Protótipo Ventura

4.2.1 Características dos materiais empregados

Dois fatores influenciaram fortemente a escolha dos materiais empregados. O primeiro é que a empresa possui um grande depósito de materiais de construção, que foram adquiridos em leilões públicos ou são refugos de obras antigas. O segundo é que ela conta com uma grande área de reflorestamento de eucalipto disponível para corte, e apresenta mão-de-obra qualificada e equipamentos propícios disponíveis para seu manuseio. Sendo assim, optou-se por maximizar o uso destes recursos. Na aquisição de material, quando necessária, foram escolhidos materiais atóxicos, pouco poluentes e de baixo conteúdo energético envolvido. Na figura 24, mostra-se algumas fotos da seqüência de construção do protótipo, com detalhes construtivos das paredes, impermeabilização, estrutura da cobertura e telhado verde.



Figura 24: fotos da construção do protótipo (em ordem: construção das paredes, tubos enterrados, estrutura da cobertura, assoalho da cobertura, estrutura da chaminé solar e fechamento da cobertura)

A fundação foi executada com uma cinta de amarração de concreto de 25cm x 25cm, utilizando tijolos como fôrma, disposta ao longo da linha das paredes. Embora as paredes sejam autoportantes, foram executados pilares de concreto (20cm x 20cm) na parede junto ao talude do terreno, para conter o empuxo do solo sobre a edificação. Os pilares estão amarrados pela viga (20cm x 20cm), que estrutura e distribui a carga do telhado.

Para o experimento, foi executado apenas o contra piso de argamassa. As paredes são de pedra de grês até a altura de 2,6m. Estas pedras apresentam a dimensão média de 60cm x 20cm x 15cm, foram partidas ao meio nos trechos curvos e configuram uma edificação como de grande inércia térmica. Acima das pedras, até o acabamento junto ao telhado, foram utilizados tijolos cerâmicos, com dimensões médias de 11cm x 5cm x 22cm fornecidos por uma olaria local. A espessura da argamassa de assentamento, utilizada no interior e exterior da administração e sanitários é de aproximadamente um centímetro.

Foi determinado o uso de “telhado verde”, tendo em vista as inúmeras qualidades desse tipo de cobertura e sua grande potencialidade como fonte de pesquisas futuras. Sua estrutura é constituída de toras de eucalipto (Ø15cm) e madeira em lâminas na parte curva junto ao telhado (3 lâminas de 10cm x 2,5cm). O assoalho da cobertura é de eucalipto laminar. Para evitar a transpiração, foi colocado um carpete entre o assoalho e a lona de impermeabilização. A drenagem é executada por uma camada de 7cm de brita, separada do solo por uma membrana geotêxtil. O solo é do próprio local e, durante o experimento, não foi plantado nenhum tipo de vegetação.

As esquadrias são de madeira de eucalipto. Foi solicitado ao executor cuidado na confecção e instalação das esquadrias, de modo a evitar as frestas ao máximo. As dimensões das esquadrias estão indicadas no tabela 6.

Tabela 6: dimensões e áreas das esquadrias do protótipo

Localização		Dimensões – vão luz (cm)	Área da es- quadria (m ²)	Superfície vidro (%)	Superf. de ventil. (%)
Administração e Sanitários	Porta externa	80x240	1,68	43	0 ou 14
	Porta interna	80x210	1,68	0	0
	Janela anterior	115x115	1,32	94	0
	Chaminé solar	85x45	0,46	96	0 ou 11
Salas de aula (2 vezes)	Porta externa	80x240	1,68	43	0 ou 14
	Janela anterior	115x135	1,56	94	0
	Janela posterior	115x45	0,52	93	0

4.2.2 Descrição dos Sistemas de Dutos Enterrados e da Chaminé Solar

Existem dois sistemas geotérmicos indiretos instalados na edificação. O primeiro retira água de um poço artesiano próximo, através de bombas hidráulicas e a conduz até o interior da sala de aula onde um trocador de calor atua para o condicionamento do ar. O segundo – foco deste trabalho – está instalado na administração. É composto por um conjunto de tubos enterrados e uma chaminé solar, que procuram ventilar a sala da administração com o ar proveniente do exterior, sem o auxílio de componentes mecânicos. O ar captado no exterior troca calor com o solo durante sua passagem pelos dutos, ganhando ou perdendo temperatura até o ingresso no ambiente. A chaminé solar, instalada na cobertura, procura aumentar a eficiência da circulação desse ar.



Figura 25: composição de cada conjunto de tubos enterrados; é demonstrado os tubos superiores, mas as dimensões se aplicam também aos tubos inferiores

Aproveitando as características da topografia, os tubos estão divididos em superiores e inferiores. Cada conjunto é formado por dois tubos de PVC³, de diâmetro 100mm e um tubo de PVC de 200mm, com 18m de comprimento. A boca interna dos tubos se encontra junto ao piso da administração. Os tubos superiores ascendem 2,8m, no sentido sul-sudeste enquanto os inferiores descendem 1,8m no sentido norte, como visto na figura 22 (implantação). A dis-

³ Os tubos de PVC, em sua maioria, são refugos de obra. Para o tubo de 100mm foi adquirido uma vara de 6m, quatro tampões e três curvas a 45°. Para o tubo de 200mm, dois tampões uma curva de 90° e outra de 45°.

tância entre os eixos dos tubos é de 0,3m (figura 25), pois o pré-dimensionamento previa o estudo e uso em separado dos tubos de diâmetro 100mm e de 200mm (resultando em um distanciamento de 0,6m entre os tubos mais estreitos). A boca externa do tubo superior permanece a maior parte do tempo sombreada, durante a manhã pelo bambuzal a leste e durante a tarde por um grande pinheiro a oeste. A boca externa do tubo inferior, passa a maior parte do tempo exposta à radiação solar.

A chaminé solar (figura 26) está instalada em um prolongamento da parede sul da edificação. Tem 0,46m² e está voltado para norte, com inclinação de 50°. Foi construída em madeira e a superfície absorvente é uma chapa metálica de zinco, pintada de preto. Possui uma cobertura única de vidro 3mm colocada de modo a deixar um espaço para a circulação de ar com a chapa.



Figura 26: fotos da montagem e forma final da chaminé solar

4.2.2.1 Funcionamento do Sistema no Verão durante o Dia e a Noite

Para melhor ilustrar o funcionamento do sistema no ambiente, é apresentado um esquema simplificado de seu perfil, sem escala. A figura 27 ilustra o modo de operação do sistema esperado durante o dia de verão, caso todos os tubos estejam abertos, considerando apenas o efeito térmico. Prevê-se que o ar no interior do ambiente e na chaminé solar seja ascendente devido ao ganho de energia por radiação e convecção em suas superfícies envoltórias. No interior dos tubos, porém, o sentido do deslocamento depende das diferenças de temperatura do ar interno do ambiente, do ar do meio externo e do solo. Como sabemos, a temperatura do solo apresenta uma variação menor de temperatura que o ar. Dessa forma, a temperatura do solo deve ser menor que a do ar durante o dia. Espera-se que as trocas térmicas por radiação e

convecção nos períodos quentes façam com que o ar que penetra no interior dos tubos perca calor para o solo, resfrie e desça, ou seja, o sentido tende a ser descendente.

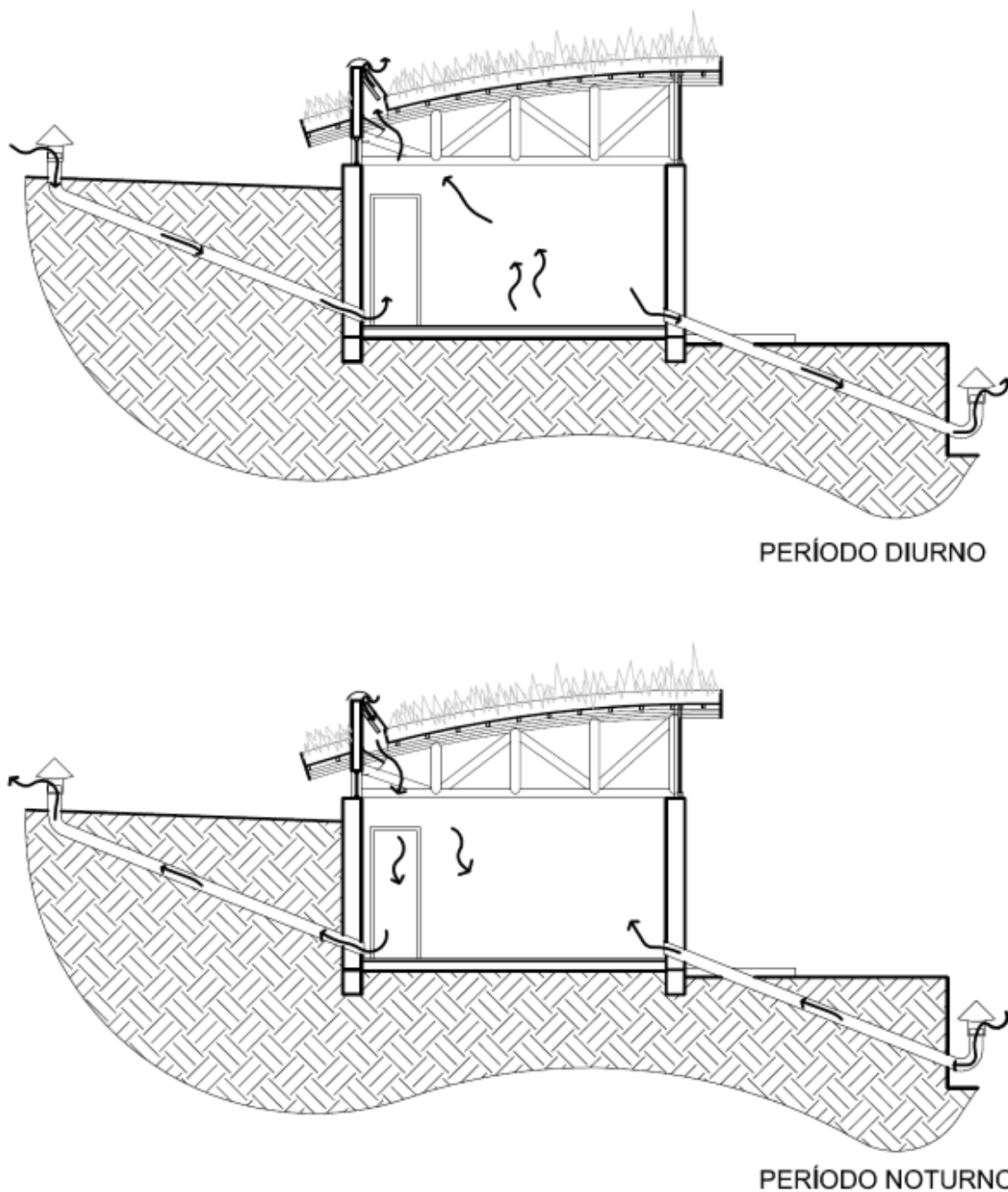


Figura 27: esquema do sentido do fluxo de ar esperado pela atuação da temperatura no verão

No período noturno, por sua vez temos uma inversão de sentido do fluxo de ar por temperatura. As envoltórias do ambiente e da chaminé solar passam a liberar o calor adquirido durante o dia, através de radiação e convecção, por suas superfícies envoltórias, fazendo com que a massa de ar interna descenda. O solo, porém, manterá sua temperatura praticamente inalterada em relação ao período diurno, ao passo que as temperaturas do ar do ambiente e do ar externo sofrerão decréscimos significativos. Nesse caso, o solo passará a fornecer o calor absorvido para o ar no interior dos dutos, gerando um movimento ascendente. Durante a alvorada e o entardecer, ocorre a situação em que o sentido do fluxo do ar depende do resultado das pressões geradas nesses três meios – no interior dos tubos, no ambiente e na chaminé solar.

O efeito gerado pela ação do vento também será influente na determinação do sentido e da velocidade do deslocamento do ar no interior do sistema. Sua ação sobre a chaminé e sobre a boca dos tubos deve ser principalmente de sucção, uma vez que estes elementos são verticais. Embora ele atue desta maneira independentemente do período diurno ou noturno, na cidade de Viamão há a predominância de períodos de calma durante a noite, e rajadas de vento durante o dia. Desta forma, prevê-se que o efeito dinâmico do vento ocorra, principalmente, durante o dia.

5 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Em um primeiro momento, este capítulo apresenta uma breve discussão sobre a definição da estratégia de pesquisa. Após, são descritos as características dos sensores utilizados, para então serem descritos a montagem experimental adotada para o monitoramento da circulação do ar através dos dutos enterrados e do comportamento térmico diário das salas e do exterior.

5.1 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DO MÉTODO DE PESQUISA

Como descrito nos objetivos, com este trabalho se pretende descobrir *como* irá ocorrer a circulação do ar no sistema, *como* essa renovação de ar afeta o desempenho térmico da edificação e *qual* a interferência gerada pela inclinação, pela orientação e pelo diâmetro dos dutos, bem como o da chaminé solar.

Como colocado por Yin (2005), estas perguntas determinariam a estratégia do método como um “experimento”. O autor do trabalho entende, porém, que o desenvolvimento de um ensaio experimental puro poderia gerar uma falsa compreensão do sistema, pois nele não estariam atuando inúmeras variáveis do clima e das características construtivas das edificações tradicionais.

Com este pensamento – de que o trabalho devesse ser representativo para edificações construídas – especulou-se, inclusive, o desenvolvimento de um “estudo de caso”, no qual algumas habitações que empregam o sistema seriam monitoradas. Essa idéia, porém, mostrou-se inviável, uma vez que os sistemas encontrados nas cidades próximas a Porto Alegre apresentam características muito distintas e tais edificações se encontram em uso, impossibilitando comparações ou medição por períodos prolongados.

Sendo assim, averiguou-se que o ideal é a condução do estudo em um protótipo de edificação, pois desse modo, seria possível observar o sistema em condições muito próximas ao real, e sem a interferência dos usuários.

Yin (2005) coloca que, embora tal estratégia possa ser classificada como de “observação”, pois se trata de um monitoramento onde não haverá interferência ou manipulação de variáveis, sua melhor descrição é de “quase-experimento”. Esta classificação, corriqueiramente utilizada nas ciências sociais, representa estudos bastante similares com experimentos – no qual para determinar a resposta existem variáveis fixas e outras controladas – porém incluem variáveis não controladas, resultantes da interação com o meio. É possível ver na tabela 7, as variáveis atuantes no sistema com sua respectiva classificação para este estudo.

Tabela 7: variáveis da pesquisa

	Variáveis			
	Controlável	Não controlável	Fixa	Resposta
Clima	Temperatura do ar externo		X	
	Umidade relativa do ar externo		X	
	Temperatura do ar interno			X
	Umidade relativa do ar interno			X
	Insolação		X	
	Velocidade do vento		X	
	Direção do vento		X	
	Precipitação		X	
Solo	Profundidade			X
	Tipo de solo			X
	Cobertura do solo			X
	Umidade		X	
Dutos	Material			X
	Diâmetro	X		
	Comprimento			X
	Velocidade / vazão			X
	Distancia entre dutos			X
	Inclinação	X		
	Orientação	X		
Características da edificação				X

As variáveis fixas são as que não variam, geralmente fruto de um controle experimental. As não controláveis são as resultantes da interferência do meio (são essas que, em geral, tornam-se fixas em estudos de laboratório). As variáveis controláveis representam aquelas que são possíveis de serem manipuladas ou graduadas, podendo ser entendidas por aquelas as quais se pretende estipular a influência sobre as variáveis de resposta.

Todas as variáveis fixas (as quais não necessitam de monitoramento) estão descritas neste trabalho. Todas as demais (à exceção da umidade do solo, indicada como de baixa relevância pela revisão bibliográfica) foram monitoradas.

5.2 INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo é descrito o equipamento utilizado no monitoramento, apresentando-se os limites de operação, as faixas de leitura, a resolução e a precisão de cada uma das sondas, bem como seu processo de calibração. Para um melhor entendimento, os equipamentos utilizados estão agrupados por fabricante.

Para realizar as medições *in loco*, foram utilizados três diferentes controladores, cada um adquirindo dados de dois ou mais sensores. A combinação das incertezas de medição dos sensores, de sua posição e de seu tempo de varredura não está aqui descrita, pois o erro gerado é pequeno, não afetando a análise de resultados para a sensação de conforto do usuário e não comprometendo os valores na complexidade estipulada para os estudos.

5.2.1 Laboratori di Strumentazione Industriale®

Na coleta de dados da sala da administração, que possui o sistema de ventilação por dutos enterrados, foi utilizado um analisador de ambientes internos, da linha instrumental BABUC®. Esse corresponde a um controlador de um conjunto de sensores, que possui programas para a aquisição, visualização, memorização e elaboração de uma grande variedade de grandezas físicas, geradas em um ambiente de informações. O aparelho possui ingressos universais, isto é, pode receber qualquer combinação de sensores, dos mais diversos tipos.

O modelo específico BABUC/A® (figura 28) utilizado na medição, possui 11 canais de ingresso. Três deles possuem finalidades específicas (anemômetro e sinal voltimétrico), enquanto os outros oito canais reconhecem, automaticamente, qualquer um dos sensores do *Laboratori di Strumentazione Industriale* conectados. Algumas sondas ocupam mais de um canal de entrada; no entanto, uma mesma sonda pode medir ou calcular uma série de grandezas, como é o caso do psicrômetro.



Figura 28: foto do equipamento de medição usado, linha BABUC/A®
(fonte: LSI, 200-)

Outro aspecto a ser destacado em sua utilização, é o nível de informação desejado, já que o aparelho permite a visualização imediata de todos os valores, instantaneamente, ou a memorização dos dados em taxas programáveis e a transferência das informações para um computador, desde que ele possua o programa de intercâmbio InfoGAP®. Embora esse programa execute funções de análise de dados, na pesquisa ele foi utilizado apenas para transferência de dados entre o BABUC/A® e o software Microsoft Excel®.

A alimentação do aparelho é realizada em 9V, sendo que possui 6 baterias internas de 1,2V, que são recarregáveis e possuem autonomia de dois dias de trabalho contínuo (desde que o visor esteja desligado). Para medições mais longas, o aparelho deve ser ligado à rede elétrica. A tensão do aparelho é 220V, porém, suas baterias operam também em 110V, com redução do período de autonomia.

Todas as sondas conectadas ao BABUC/A® vêm calibradas de fábrica e devem ser recalibradas a cada dois anos no laboratório da empresa, conforme orientações constantes nos manuais do fabricante. Por ser um equipamento novo, seus resultados foram apenas comparados com os de outros sensores, para corrigir eventuais discrepâncias. No Protótipo Ventura, foi medida ou calculada a temperatura de globo, temperatura de bulbo seco (com ventilação forçada), temperatura de bulbo úmido (com e sem ventilação forçada), a umidade relativa do ar e a velocidade do ar.

Segundo o *Laboratori di Strumentazione Industriale* (LSI, 200-), os sensores do BABUC/A® não devem ser expostos diretamente à radiação solar, para que não ocorra deformação nos dados registrados e/ou danos de caráter irreversível aos sensores. Em nenhum momento, durante todo o período de medição, os valores registrados ultrapassaram os limites estabelecidos.

5.2.1.1 Psicômetro

Esta sonda é projetada conforme a ISO/DIS 7726 (1996). A partir dos valores medidos para a temperatura do ar, com o bulbo seco e bulbo úmido, ambos sob ventilação forçada, ela permite ao equipamento calcular, com uma boa confiabilidade, a umidade relativa do ar e a temperatura de orvalho.

A sonda psicrométrica é constituída de dois sensores de temperatura do tipo Pt100 (platina). O primeiro é um termômetro que mede a temperatura de bulbo seco do ar. O segundo é um termômetro revestido por uma bainha de algodão, imersa em um recipiente com água destilada, o qual mede a temperatura de bulbo úmido, sob ventilação forçada, através de um pequeno ventilador, que proporciona uma velocidade do ar superior a 4,5 m/s. Os termômetros estão localizados dentro de um duto metálico, de alumínio anodizado, ficando protegidos da influ-

ência da radiação solar, ou, mesmo, da ação das correntes de ar externo, que poderiam interferir na precisão dos valores medidos (figura 29).



Figura 29: foto do psicrômetro (fonte: LSI, 200-)

Esta sonda ocupa dois canais de ingresso no BABUC/A® e apresenta os seguintes limites ambientais de operação: 0°C a 60°C, para situações em que o recipiente está com água, e 10°C a 60°C, para situações onde o recipiente está sem água (situação inexistente no método adotado). As faixas de leitura das variáveis medidas e calculadas pelo equipamento são de -25°C a 150°C, para temperatura de bulbo seco; de 0 a 60°C para temperatura de bulbo úmido; de -20°C a 60°C para a temperatura de orvalho e de 0 a 100%, para a umidade relativa. A água destilada foi acrescentada, com intervalo máximo, semanal.

A precisão indicada nos manuais do fabricante, para os termômetros, é de 0,13°C, para a temperatura em torno de 20°C. Para a umidade relativa (em faixas de temperatura entre 15°C e 20°C) o aparelho apresenta 2% de precisão, para umidade entre 15% e 40%, 1%, para umidade entre 40% e 70%, e 0,5%, para umidade entre 70% e 98%.

5.2.1.2 Termômetro de Globo ou Globo de Vernon digital

Esta sonda é constituída de um globo metálico negro, de 15cm de diâmetro. Seu interior é oco e, no centro, é fixado o sensor térmico. Na sonda ligada ao BABUC/A®, o sensor é do tipo Pt100. A temperatura medida corresponde à temperatura média radiante.

O globo possui emissividade elevada (maior ou igual a 0,98) e reflexão baixíssima (menor que 2%), de forma a funcionar como um corpo negro em relação à radiação infravermelha. Na figura 30 pode ser observada uma sonda semelhante àquela utilizada no experimento.

Mediante os valores registrados por essa sonda, é possível avaliar e verificar a carga térmica radiante, que é extremamente importante para a análise dos ambientes quentes e moderados. Em particular, esta sonda é indispensável para o cálculo dos índices PMV, PPD e IBUTG, entre outros.

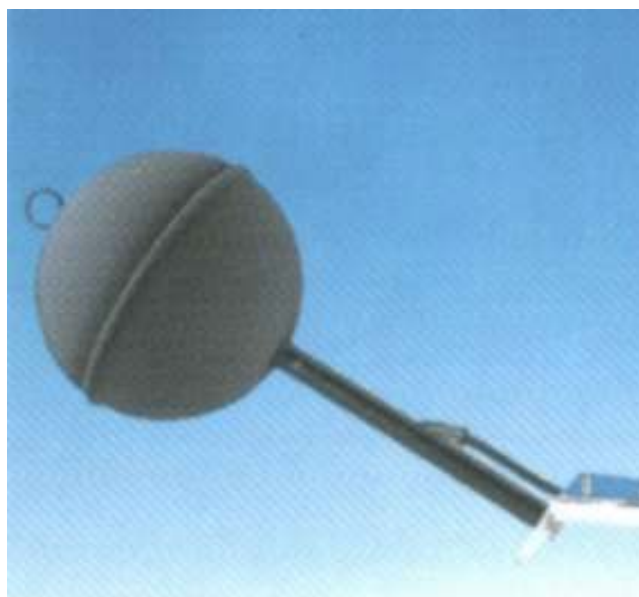


Figura 30: foto do termômetro de globo (fonte: LSI, 200-)

A sonda necessita de um tempo de resposta equivalente a 20 minutos para estabilizar o valor da temperatura interna. A que está ligada ao BABUC/A® ocupa um canal de ingresso. O seu campo de leitura abrange a faixa de -10°C a 100°C , com a precisão indicada pelo manual do fabricante que é de $0,15^{\circ}\text{C}$ para temperaturas de 0°C . A sonda não necessita nenhuma manu-

tenção especial, mas o globo não pode estar amassado, nem sujo, visto que isso poderia alterar suas características físicas e distorcer os dados medidos. O globo foi limpo semanalmente.

5.2.1.3 Anemômetro de fio quente

O anemômetro de fio quente (figura 31) mede a velocidade do ar. Nesse instrumento, uma corrente elétrica percorre um filamento de platina e, através do efeito *Joule*, mantém sua temperatura superior à do ambiente. Sabendo-se do coeficiente de dispersão de calor do filamento, a velocidade do ar é calculada baseada na intensidade da corrente necessária para mantê-lo a uma temperatura constante. A sonda é utilizada para medir a velocidade do ar em todas as direções.

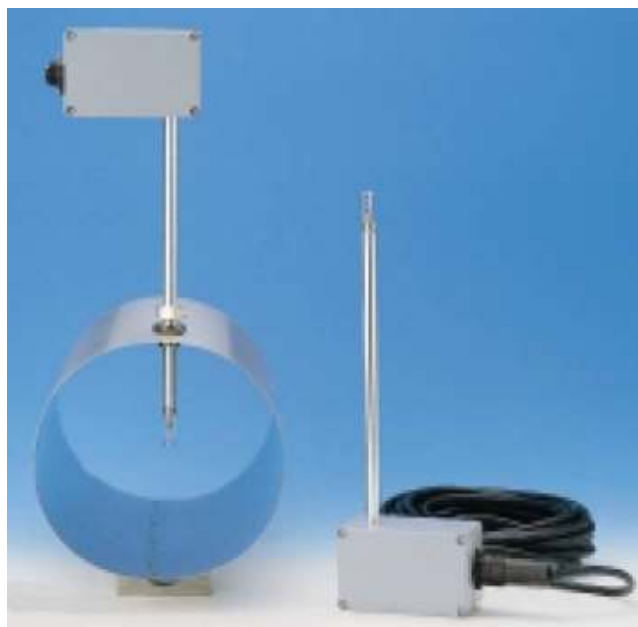


Figura 31: foto do anemômetro de fio quente (fonte: LSI, 200-)

Quando conhecido o diâmetro dos dutos, o volume da sala e a sua temperatura, é possível programar o BABUC/A® para calcular o fluxo de ar em volume (m^3/s) e massa (kg^3/s) e o número de renovações de ar. A sonda opera com movimentos do ar maiores que $0,01\text{m/s}$, sua resolução é de $0,01\text{m/s}$ e sua precisão é de 4% para ventos menores que 1m/s . A temperatura de operação do filamento de platina é entre -10°C e 200°C e do sistema elétrico, entre -10°C e

80°C. A umidade relativa de operação, para ambos, é entre 0% e 98%, antes de haver condensação.

5.2.2 Full Gauge Eletro Controles Ltda®

Na coleta de dados do ambiente exterior, sanitários e tubos, foram utilizadas controladoras de climatização da linha TC-900 CLOCK® e MT-530 PLUS®, desenvolvidos pela *Full Gauge Controls*®. Essas controladoras possuem programas para a aquisição e visualização de dados de temperatura e umidade para dois sensores. A configuração do aparelho permite o controle automático de equipamentos de refrigeração e umidificação.

Como descrito nos manuais do fabricante, caso ligado a um computador, é possível visualizar e armazenar os dados com o uso do programa SITRAD®, em períodos programáveis. A comunicação com os instrumentos é feita através da porta serial (COM 1), sendo necessário um conversor de RS232 para RS485. Os controladores são configurados com números de protocolo, e o sistema executa uma varredura à taxa de comunicação de 28.800bps. Desta forma, os sensores são identificados automaticamente e há garantia da integridade dos dados, sem interferência. Embora este programa execute funções de análise de dados, na pesquisa, ele foi utilizado apenas para transferência de dados entre o software e o Microsoft Excel®.

Todas as sondas conectadas às controladoras vêm calibradas de fábrica, porém devem ser igualadas a uma mesma temperatura conhecida. Mesmo sendo os equipamentos novos, seus resultados foram comparados com os de outros sensores. Com esse equipamento, no Protótipo Ventura, mediu-se a temperatura de bulbo seco (sem ventilação forçada) e a umidade relativa do ar.

5.2.2.1 TC-900 CLOCK®

O TC-900 CLOCK® (figura 32) é um controlador inteligente de refrigeração, degelo e fases posteriores, que proporciona melhoria do rendimento frigorífico e economia de energia. Possui relógio interno, que pode ser ajustado conforme a hora do computador. A cada controlador são integrados dois sensores de temperatura, tipo termistores (NTC). O primeiro é responsável

por medir a temperatura do ambiente climatizado e o segundo, a do evaporador, permitindo o controle do final do degelo, o retorno do ventilador e outras funções importantes. Na pesquisa, essas funções foram desabilitadas, e os termômetros foram utilizados independentemente apenas para medir a temperatura em pontos específicos do sistema.



Figura 32: foto da controladora TC 900 clock e dos sensores de temperatura encapsulados (fonte: Fullgauge Controles, 2006)

Os sensores possuem encapsulamento de aço inoxidável de fábrica, para proteção física. A forma final é cilíndrica, com diâmetro de 0,5cm e comprimento de 4cm. O cabo utilizado é PP2x24AWG e pode ser prolongado até 200m, sem prejuízos ao sinal. Dados mais específicos sobre a construção do sensor, cabeamento e encapsulamento não puderam ser fornecidos pela fábrica. Os termômetros operam entre -50°C a 75°C . A precisão é de 1°C para temperaturas entre -50°C e -10°C , e de $0,1^{\circ}\text{C}$ para temperatura entre -10°C e 75°C .

5.2.2.1.1 Calibração dos sensores do TC-900 CLOCK®

Os sensores NTC de temperatura, fornecidos pela *Full Gauge Eletro Controles LTDA®*, já vêm calibrados de fábrica. Porém, foi executada uma averiguação da dispersão de seus resultados entre si e em comparação a dois termômetros de mercúrio, fabricados pela *INCO-TERM®*, com precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$ e abrangência de -10°C a 50°C . Um conjunto de seis sensores NTC foi mergulhado em banho termostático, juntamente com os termômetros de mercúrio (figura 33). Iniciaram-se os registros com a temperatura da água de 0°C e, nesse momento, as controladoras TC-900 CLOCK® foram “zeradas”. Através de uma rotina computacional, ocorreu o aquecimento da água até a temperatura de 36°C , com momentos de estabilização a cada 5°C .



Figura 33: fotos da calibração dos sensores NTC de medição de temperatura

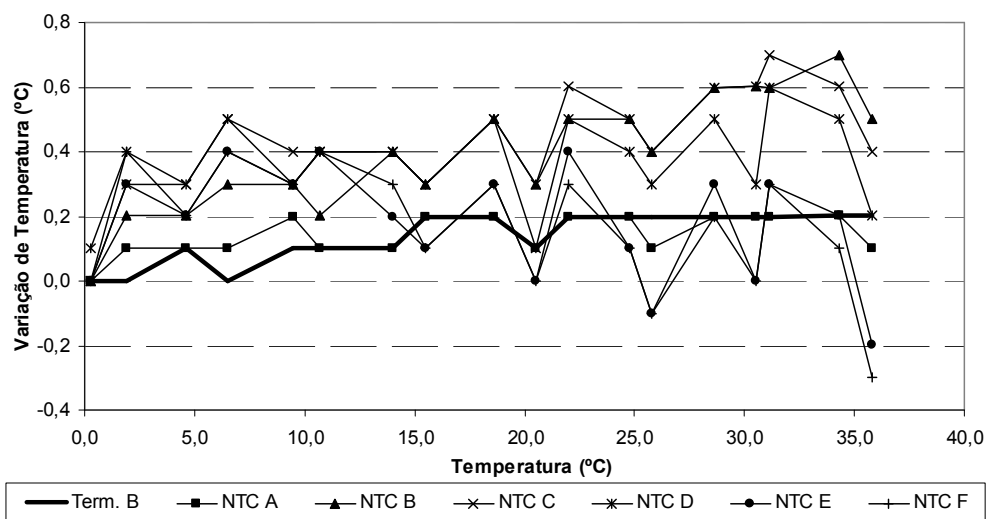


Figura 34: gráfico demonstrando a variação dos resultados com o aumento da temperatura

Os termômetros de mercúrio apresentaram dispersão de, no máximo, $0,2^{\circ}\text{C}$. Na figura 34, observa-se que a dispersão máxima dos sensores NTC, em relação aos termômetros de mercúrio, foi de $0,7^{\circ}\text{C}$ e, entre si, de $0,8^{\circ}\text{C}$. Consta-se, também, que quanto maior a diferença de temperatura em relação à temperatura inicial (na qual todos sensores apresentavam registros iguais), maior é a dispersão dos resultados. Dessa forma, optou-se por estabelecer a temperatura de 25°C como base para ajuste dos sensores.

5.2.2.2 MT-530 PLUS®

O MT-530 PLUS® (figura 35) é um instrumento que controla e indica a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar. É útil para locais que necessitem ser monitorados e supervisionados, como CPDs, desumidificadores, adegas climatizadas, secagem de grãos, etc.. Possui relógio interno, que pode ser ajustado conforme a hora do computador.



Figura 35: foto da controladora MT-530 e dos sensores de temperatura encasulados (fonte: Fullgauge Controles, 2006)

O sensor de temperatura é do tipo termistor (NTC) e o de umidade é um umidostato. Os sensores estão fixados juntos, dentro de uma envoltória permeável protetora. Como a controladora anterior, dados mais específicos sobre a construção do sensor, cabeamento e encapsulamento não puderam ser fornecidos pela fábrica. Os termômetros operam entre -10°C a 70°C com precisão é $0,1^{\circ}\text{C}$. Os umidostatos operam na faixa de 5% a 100% (sem condensação, até 90%), com precisão de 0,1%.

5.2.2.2.1 Calibração dos sensores do MT-530 PLUS®

Os sensores do MT-530 PLUS não permitem mergulho em meio líquido. Dessa forma, as duas controladoras utilizadas e o termômetro de globo analógico (descrito posteriormente) foram colocados, juntamente com os sensores do BABUC/A®, que serviram de prova, em uma sala fechada com ventilação forçada por 24h. Após 18h na sala, seus resultados foram iguais em mesma temperatura e umidade relativa. Os resultados foram monitorados e registrados manualmente durante as horas restantes, em intervalos de 90min, e expostos na tabela 8 e 9. Não ocorreram grandes variações de temperatura ou de umidade relativa dentro da sala, e a dispersão de resultados foi pequena.

Tabela 8: valores de temperatura do ar registrados pela sonda BABUC/A® e os sensores do MT-530 PLUS

horário	TBS BABUC/A	TBS Sensor A	dispersão Sensor A	TBS Sensor B	dispersão Sensor B
16:30	19,8	19,4	-0,4	19,6	-0,2
18:00	19,6	20,0	0,4	20,0	0,4
19:30	19,4	19,8	0,4	20,0	0,6
21:00	19,5	19,6	0,2	19,5	0,1

Tabela 9: valores de umidade relativa do ar registrados pela sonda BABUC/A® e os sensores do MT-530 PLUS

horário	UR (%) BABUC/A	UR (%) Sensor A	dispersão Sensor A	UR (%) Sensor B	dispersão Sensor B
16:30	83,2	81,1	-2,1	80,9	-2,3
18:00	85,4	82,1	-3,3	83,9	-1,5
19:30	88,7	82,4	-6,3	84,1	-4,6
21:00	80,6	81,1	0,5	79,6	-1,0

5.2.3 Sondas independentes

Na coleta dos dados de radiação solar horizontal, velocidade e direção do vento no exterior foram utilizadas sondas de outros fornecedores. Esses equipamentos foram controlados a partir de uma placa CIO-DAS802/16, instalada em um computador Pentium 266MZ, com 64MB de memória RAM.

A placa possui três contadores, baseados no 82C54, com oito canais analógicos de entrada absolutos ou oito diferenciais configuráveis individualmente por chave com 1Kamostras de FIFO. Sua resolução é de 12 bits, para conversor analógico/digital, e a velocidade é de 50kHz, com gatilhos digital ou programável. As faixas de entrada são de $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 2.5V$, $\pm 1,25V$ ou 0 a 10V, 0 a 5V, 0 a 2,5V, 0 a 1,25V.

No software HP-VEE Pro 6.01®, da *Agilent Technologies*®, foi desenvolvida uma rotina para leitura do sinal, conversão para a escala desejada, cálculo, visualização e armazenamento dos dados coletados (figura 36). A comunicação com os instrumentos ocorreu através de cabo

com malha devidamente aterrado. Os dados foram armazenados em formato de texto (TXT) e exportados para o Microsoft Excel®. Todas as sondas conectadas à placa foram calibradas independentemente. No Protótipo Ventura, mediu-se a radiação solar no plano horizontal, a direção do vento a 7m de altura e sua velocidade a 10m e a 0,5m de altura.

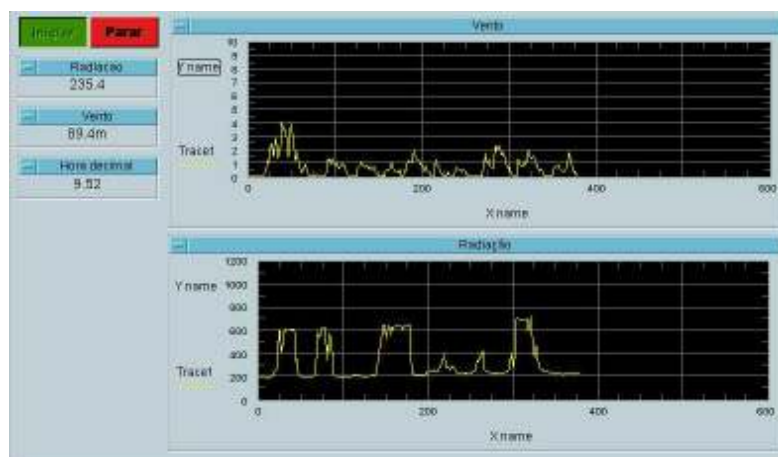


Figura 36: foto da tela da rotina criada no software HP-VEE Pro 6.01 da Agilent Technologies®

5.2.3.1 Anemômetro de copos fabricado no LETA

O anemômetro de copos é um instrumento eletrônico de medição destinado a fornecer indicações diretas da velocidade do ar. É indicado para medições no campo do vento atmosférico e de sistemas industriais de ventilação e ar condicionado. O elemento sensível à velocidade do vento é um rotor de três hemisférios (Sistema Robinson), com eixo de rotação vertical. Por meio de um sistema indutivo, essa rotação é transformada em tensão que é aplicada a um circuito de medição que, no caso desta pesquisa, é a rotina computacional desenvolvida, na qual essa tensão é automaticamente convertida para valores de velocidade do vento.

5.2.3.2 Anemômetro de copos KW-820

O anemômetro KW-820 (figura 37) foi fabricado pela SCR (Sistemas de Controle e Regulação LTDA). Tem as mesmas aplicações e o mesmo elemento sensível à velocidade do vento

que o anterior. Porém, por meio de um sistema indutivo, esta rotação é transformada em pulsos (2 a cada volta) que são aplicados ao circuito de medição. Para a conversão dos pulsos em valores de velocidade do vento, o aparelho vem dotado de um galvanômetro de alta sensibilidade que, no caso desta pesquisa, não foi utilizado, pois foi empregada a rotina computacional desenvolvida.

O sistema rotativo do sensor consta de um eixo vertical, dotado de dois micro-rolamentos de esfera. O instrumento vem equipado de fábrica com uma lubrificação permanente. Não devem ser utilizados óleos, graxas ou outros lubrificantes quaisquer. O fabricante recomenda limpar periodicamente com uma flanela seca e, convenientemente, guardá-lo em seu estojo quando não estiver em uso. Deve-se evitar exposições prolongadas em ambientes com temperaturas superiores a 50°C, bem como os que contenham muita umidade e poeira em suspensão. O aparelho encontrava-se danificado foi reparado antes da calibração.



Figura 37: foto do anemômetro de copos KW-820

5.2.3.2.1 Calibração dos anemômetros de copos

O anemômetro usado como padrão é o Termo Anemômetro AVM-03 que fornece os dados já convertidos em velocidade do vento. Sua faixa de operação é de 0,0m/s a 45,0m/s, sua resolução é de 0,1m/s, sua linearidade é de 0,3m/s e sua precisão é de $\pm 0,1$ m/s ou $\pm 3\%$.



Figura 38: fotos do conserto, calibração e instalação dos anemômetros de copos utilizados

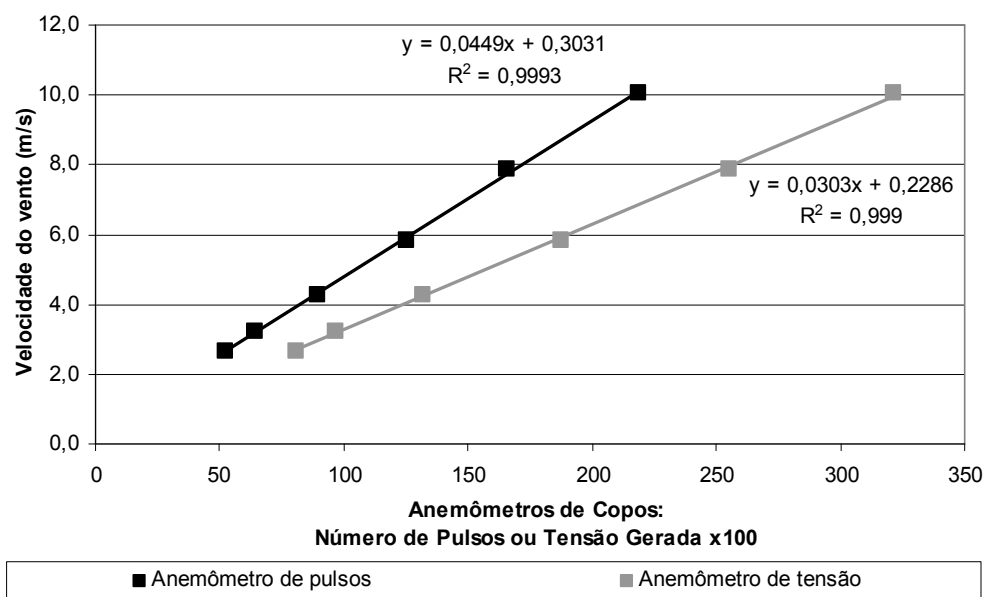


Figura 39: curva de calibração dos anemômetros de copos utilizados

A curva de calibração dos anemômetros foi feita no túnel de vento do Laboratório de Estudos Térmicos e Aerodinâmicos (LETA), na Engenharia Mecânica da UFRGS. Em um primeiro momento, foi posicionado o anemômetro padrão, com auxílio de hastes metálicas, e estipuladas as velocidades de ciclos do motor de 15, 17,5, 22,5, 30, 40 e 52,5. Para cada velocidade, foram feitos, no mínimo, 45 registros, manualmente. A operação foi repetida com ambos os anemômetros de copos e os resultados foram registrados com o auxílio da mesma rotina computacional utilizada para aquisição de dados no protótipo (figura 36). Foi feita a média dos

resultados e, com o auxílio do programa CurveExpert 1.3 (*Copyright de Daniel Hyam*), foi encontrada a curva ideal de calibração de cada anemômetro, demonstrada na figura 39.

5.2.3.3 Biruta Eletrônica

Para o registro da direção do vento, foi construída uma biruta eletrônica com oito quadrantes. Ela é constituída de um tubo de PVC de 60cm, uma chapa de PVC de 40x30cm como cauda e uma barra metálica de contrapeso. Ela se sustenta sobre um rolamento que gira sobre uma placa eletrônica de silício dividida em quatro quadrantes eletrificados. Nas laterais do tubo de PVC, foram instalados dois sensores que lêem o sinal emitido pelos quadrantes. Eles estão afastados a uma distância equivalente a 1/8 do tamanho total do círculo gerado pela rotação do eixo. Desta forma, dependendo da direção do vento, os sensores lêem o sinal de um ou dois quadrantes permitindo, por combinação, a leitura de oito quadrantes (figura 40).

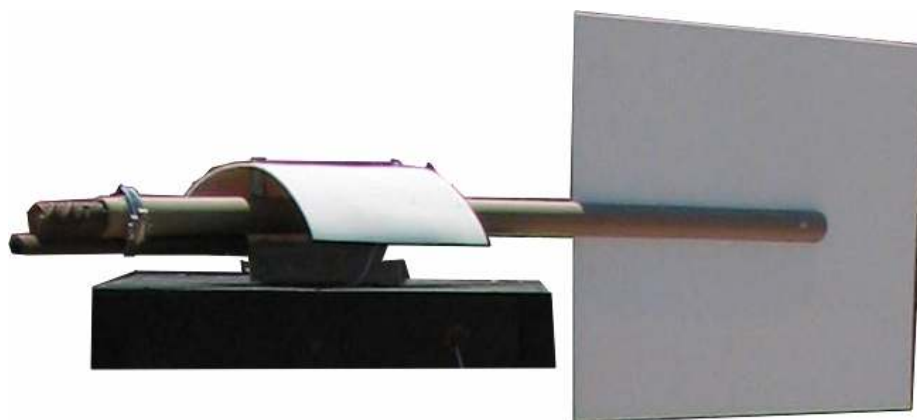


Figura 40: foto da biruta eletrônica construída e utilizada nas medições

5.2.3.4 Solarímetro

O solarímetro utilizado (figura 41) foi construído e calibrado pelo Laboratório de Energia Solar da UFRGS. O solarímetro é constituído de uma célula fotovoltaica fixada dentro de um recipiente cilíndrico de alumínio de 200 mm de diâmetro e 300 mm de altura. A superfície

superior é constituída de um material difusor, que cobre a célula fotovoltaica e fornece praticamente a mesma reflexão para qualquer ângulo azimutal.

A célula fotovoltaica é um dispositivo semicondutor, que converte parte da energia solar incidente em eletricidade. Sua principal característica é a curva corrente X tensão, que varia com a irradiância solar incidente de forma diretamente proporcional. O solarímetro foi instalado a 10m de altura do solo, sobre a cobertura do protótipo, em posição horizontal.



Figura 41: foto do Solarímetro utilizado

5.2.3.4.1 Calibração do solarímetro

O solarímetro utilizado já apresentava, gravado na base do aparelho, o fator de conversão de sua tensão gerada para irradiância global. Entretanto foi executado, junto ao Laboratório de Energia Solar da UFRGS, a conferência desse fator.

Para tanto, ele foi instalado junto com um piranômetro Eppley (considerado com padrão) em um plano inclinado a 45°. O experimento de coleta de dados foi realizado em um dia parcialmente nublado, com grande alternância entre nuvens e sol, no período da manhã, entre as 10 e 11 horas solares (31 de outubro). O sistema de aquisição de dados foi configurado para fazer leituras com intervalos de 2 segundos, usando três casas decimais. Os dados foram gravados em disco rígido e apresentados na figura 42. Como observado, a curva de calibração anteriormente calculada apresenta uma pequena dispersão dos valores registrados pelo piranômetro padrão e foi mantida durante a pesquisa.

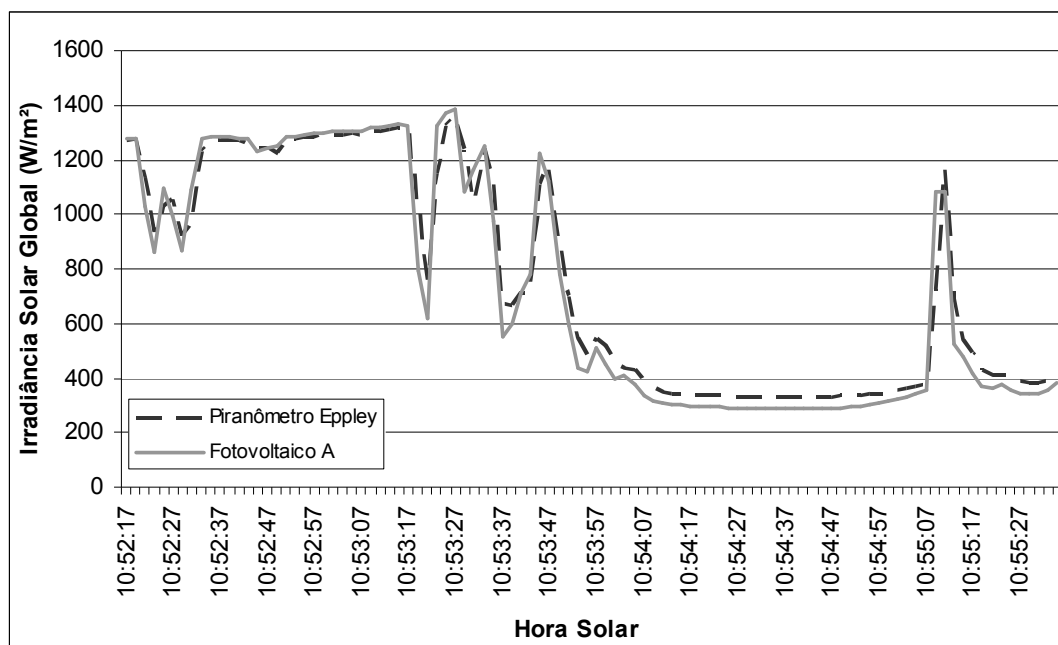


Figura 42: curva de calibração do solarímetro

5.2.3.5 Termômetro de Globo Analógico ou Globo de Vernon Analógico

O termômetro de globo analógico utilizado não possuía manual determinando suas características ou precisão. Trata-se de uma esfera negra com diâmetro de 15cm e interior oco, onde é fixado o termômetro de mercúrio. O campo de leitura do termômetro varia de -20°C a 100°C , divididos em escalas de $0,2^{\circ}\text{C}$ – fato que indica seu campo de abrangência e precisão.

O globo possui emissividade elevada (maior ou igual a 0,98) e reflexão baixíssima (menor que 2%), de forma a ser um corpo negro em relação à radiação infravermelha. Na figura 43 pode ser observada a sonda semelhante àquela utilizada no experimento. Mediante os valores registrados por essa sonda, é possível avaliar e verificar a carga térmica radiante, que é extremamente importante para a análise dos ambientes quentes e moderados. Em particular, esta sonda é indispensável para o cálculo dos índices PMV, PPD e IBUTG, entre outros. Os resultados desta sonda foram coletados apenas manualmente.



Figura 43: foto do termômetro de globo analógico utilizado

5.2.3.5.1 Calibração do Termômetro de Globo Analógico

Assim como os sensores do MT-530 PLUS®, o termômetro de globo analógico foi colocado, juntamente com os sensores do BABUC/A®, em uma sala fechada, com ventilação forçada, para a aferição de seus resultados por 24h. Seus resultados foram monitorados e registrados manualmente durante as quatro últimas horas, também em intervalos de 90min, e expostos na tabela 10. Observamos que a variação de temperatura radiante dentro da sala foi mínima, assim como a dispersão dos resultados.

Tabela 10: valores de temperatura média radiante registrados pela sonda BABUC/A® e o termômetro de globo analógico

hora	TGB	TGA	dispersão
16:30	19,6	19,4	-0,2
18:00	19,7	19,6	-0,1
19:30	19,6	19,6	0,0
21:00	19,5	19,4	-0,1

5.3 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrita a montagem experimental. Considera-se importante descrever minuciosamente esta etapa, para que trabalhos futuros tenham uma referência clara do procedimento adotado e, no caso de uma repetição do experimento, os resultados possam ser comparados.

Por ocorrer no período de primavera e verão, o horário da medição sofreu influência do horário de verão brasileiro. Esta diferença de uma hora, porém, foi descartada, mantendo os relógios das controladoras no horário convencional.

5.3.1 Estudo Piloto

Foi executado um estudo piloto durante o mês de julho de 2005, no qual foi monitorada uma edificação no Centro Integria que utiliza dutos enterrados na ventilação interna. As medições ocorreram durante um dia e permitiram a familiarização do pesquisador com a programação e com o funcionamento da controladora BABUC/A® e suas sondas, bem como avaliar os procedimentos e as grandezas que implicariam na determinação das condições térmicas do ambiente e no deslocamento do ar nos dutos.

Não foi localizada na bibliografia uma definição sobre o intervalo de tempo ideal para as medições, pois os sistemas similares não apresentam elementos de variação abrupta, como a velocidade do vento. Dessa forma, para o estudo preliminar, foi eleito o intervalo de dez minutos para a coleta de dados devido à disponibilidade do pesquisador e à melhor avaliação dos parâmetros de conforto.

No exterior, manualmente e à sombra, foram coletados dados de temperatura com um termômetro de mercúrio, e umidade relativa do ar com um higrômetro. No interior, através da controladora BABUC/A®, os dados de temperatura do ar de bulbo seco (com ventilação forçada), de bulbo úmido (com e sem ventilação forçada), temperatura radiante assimétrica e média, além da velocidade do vento em um dos dutos enterrados (existe um total de três dutos).

Os resultados numéricos adquiridos no estudo piloto não estão listados neste trabalho. A principal conclusão deste estudo foi que o intervalo de tempo não estava apropriado. O ambiente não apresentava variações tão bruscas de temperatura e umidade que justificassem medições

em períodos curtos, ao mesmo tempo, a velocidade do ar dentro do duto variava constantemente e o valor instantâneo coletado não era significativo. Outra observação foi que, devido à pequena extensão do cabo do anemômetro de fio quente, as demais sondas não puderam ser posicionadas no centro da sala, de modo que as medições de temperatura de globo ficaram prejudicadas.

5.3.2 Descrição da Montagem Experimental

A montagem experimental iniciou-se no dia 20 de outubro e apresentou três etapas distintas que serão descritas posteriormente. Sendo assim, a montagem experimental sofreu alterações no decorrer do monitoramento com o intuito de melhor responder aos objetivos de cada uma.

Para manter a segurança dos equipamentos, optou-se por manter portas e janelas fechadas, porém, diferente de Becker (1992), não foram vedadas as esquadrias para reduzir o efeito das infiltrações, visto que, em situações reais de uso, ela sempre ocorrerá sem o controle dos usuários sobre esse aspecto. Preocupou-se, porém, em encomendar esquadrias com a menor quantidade de frestas possíveis.

As portas internas permaneceram fechadas durante todo o período de medições, para não circular ar entre elas. As medições foram executadas sem qualquer ocupante ou equipamento diferente dos de medição no interior dos ambientes. Foram desconsiderados os dados quando ocorreram visitas.

5.3.2.1 Comparação do Comportamento Higrotérmico dos Ambientes

Como vimos no capítulo de descrição do protótipo, a configuração da planta é simétrica em relação ao eixo norte-sul. Desta forma, além do ambiente externo, foi monitorada a sala da administração (na qual está instalado o sistema de tubos) e os sanitários, que possuem as mesmas dimensões, porém orientações diferentes.

A intenção desta etapa foi observar o comportamento térmico das salas, primeiramente estando ambas totalmente fechadas e, na seqüência, com o sistema de tubos aberto. Com isso, pretende-se determinar o padrão da curva diária de temperatura do ar das salas juntamente com

as diferenças médias de umidade relativa e absoluta, averiguando a possibilidade de futuras comparações e as modificações significativas ocorridas nesses elementos, juntamente com o deslocamento do ar com a abertura dos tubos e da chaminé solar.

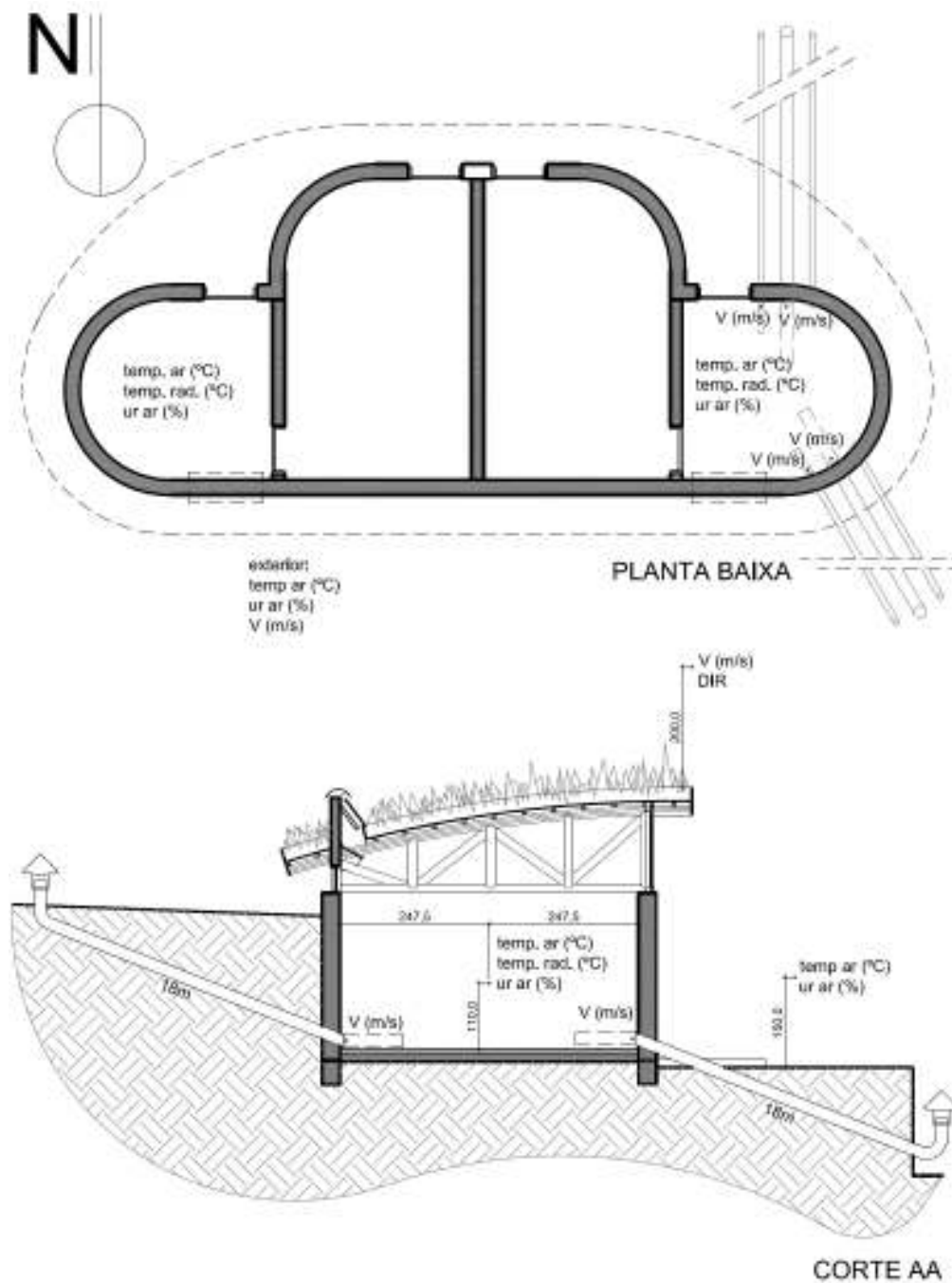


Figura 44: esquema com a posição dos sensores durante o estudo do comportamento higrotérmico dos ambientes

Este estudo ocorreu por sete dias, cinco dos quais os ambientes estavam selados e dois onde os tubos foram abertos. Com a permanência do pesquisador junto ao experimento, tornou-se viável o estudo de um número maior de variáveis com a utilização de instrumental mais simples e sem capacidade de armazenamento de dados. A tabela 11 representa o cabeçalho da tabela preenchida no período e expõe as grandezas climáticas monitoradas nas posições indicadas na figura 44. O intervalo de tempo estipulado nesta etapa, para todas as sondas, foi de 30 minutos.

No exterior, foram coletados manualmente os dados de temperatura e umidade relativa do ar, com um termômetro de mercúrio e um higrômetro, à sombra. A velocidade foi registrada por um anemômetro de copos a 2 metros de altura do telhado (ou 10m do solo), juntamente com a direção do vento que foi registrada manualmente com a ajuda de um balão de festas. A medição externa permaneceu inalterada ao longo dos sete dias.

Tabela 11: dados coletados durante o estudo do comportamento higrotérmico dos ambientes

DADOS EXTERNOS							
Hora	Vento		Temperatura do Ar (°C)	Umidade (%)			
	Velocidade (m/s)	Direção					
AMBIENTE SEM VENTILAÇÃO NATURAL – SANITÁRIO							
Hora	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Calor médio radiante (°C)				
AMBIENTE COM VENTILAÇÃO NATURAL POR DUTOS ENTERRADOS – ADMINISTRAÇÃO							
Hora	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Calor médio radiante (°C)	Vento: Velocidade (m/s) e Sentido			
				IF Ø100	IF Ø200	SP Ø100	SP Ø200

No interior dos sanitários, foram instalados um termômetro de globo, um sensor de temperatura e um higrômetro no centro da sala a uma altura de 1,1m. O termômetro de globo exigiu a entrada do pesquisador no ambiente, pois a leitura é analógica e não possibilitava registros eletrônicos. Buscando reduzir a troca de ar com o exterior, a entrada nos banheiros se deu pela sala central.

No interior da administração, nos primeiros cinco dias, foram coletados os dados de temperatura média radiante e temperatura, umidade relativa e velocidade do ar através das sondas da BABUC/A®, no centro da sala, a uma altura de 1,1m. Ao serem abertos todos os tubos e o exaustor, foram registrados os dados de velocidade instantânea do ar com o anemômetro de fio quente e o sentido do deslocamento do ar junto à extremidade interna, com a observação de um barbante previamente fixado. Como se possuía apenas um anemômetro de fio quente, esta operação teve de ser realizada em um tubo de cada vez e exigiu a entrada do pesquisador no ambiente. Da mesma forma que nos sanitários, a entrada na administração se deu pela sala central.

5.3.2.2 Observação dos fatores influentes na circulação de ar no interior dos dutos enterrados

Esta etapa tem por objetivo observar os fatores influentes na circulação de ar no interior dos dutos. Por exigir dias de sol (para maximizar a influência da diferença de temperatura), as medições ocorreram em dias não consecutivos entre os dias 10 de dezembro de 2005 a 12 de janeiro de 2005.

Devido à disponibilidade de apenas um anemômetro de fio quente, o qual deveria coletar dados em um pequeno intervalo de tempo, optou-se por estudar um tubo de cada vez, mantendo os demais selados. Desta forma, monitorou-se ao longo de um dia o comportamento da sala com diferentes configurações, resultando em um total de nove dias. Primeiramente, ela permaneceu totalmente fechada (incluindo os tubos, esquadrias e chaminé), na seqüência, foi aberto cada um dos tubos e, por último, foi mantida aberta a chaminé solar e novamente abriu-se independentemente cada um dos tubos.

Com a finalidade de estudar também o comportamento noturno e em períodos menores, a partir deste estudo ocorreu a inclusão de novas sondas, e os registros passaram a ser eletrônicos em praticamente sua totalidade (à exceção do sentido do fluxo no interior dos tubos). A localização das sondas está demonstrada na figura 45.

No exterior, foram registradas a temperatura e a umidade relativa do ar a uma altura de 110cm, com um sensor NTC e um higrômetro, respectivamente. A temperatura do solo passou a ser monitorada em cinco profundidades diferentes, com sensores NTC (5cm, 50cm, 100cm, 200cm e 300cm).

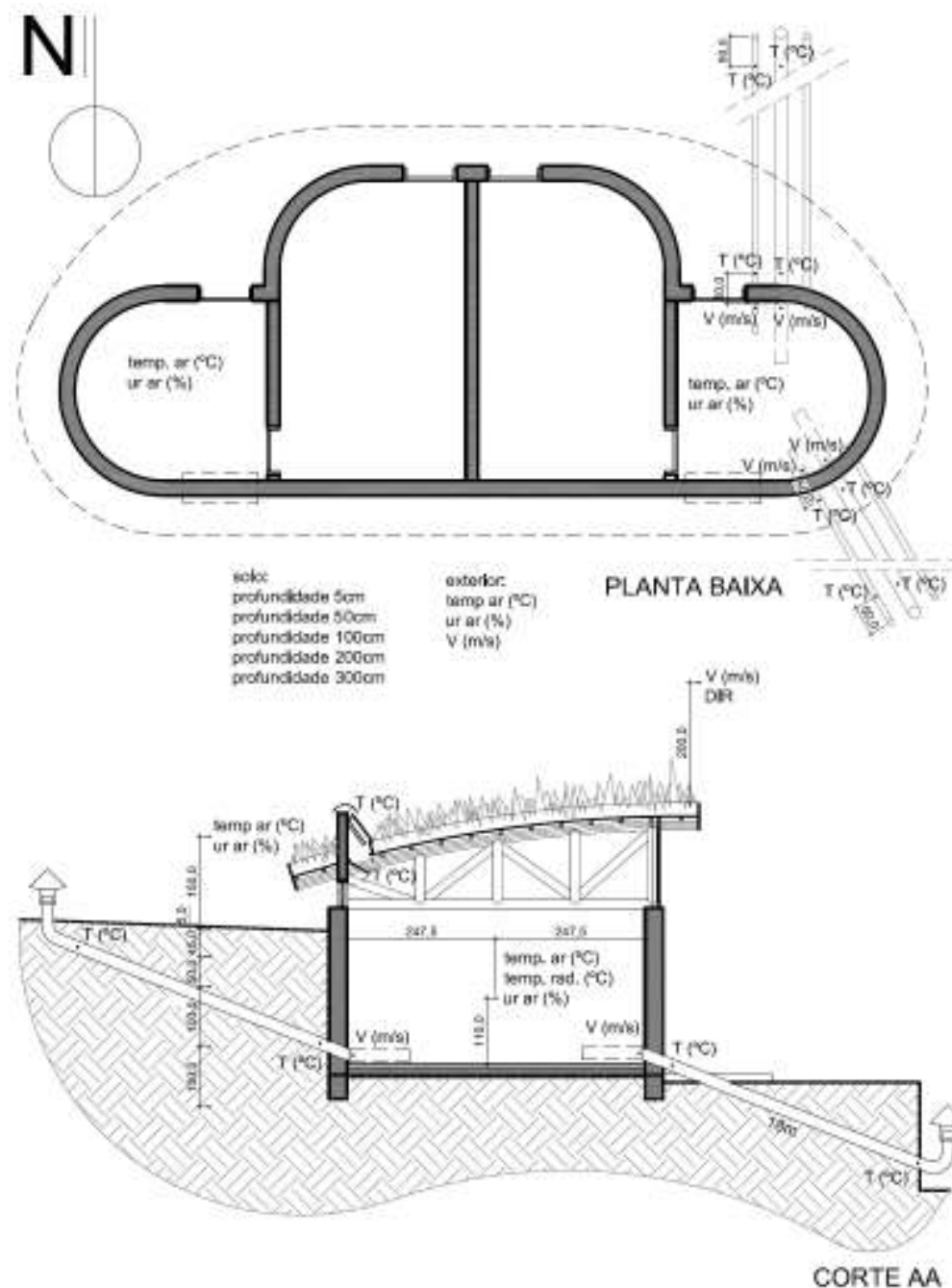


Figura 45: esquema com a posição dos sensores durante a observação das grandezas físicas influentes na circulação de ar no interior dos dutos

Para proteger e sombrear as sondas e a superfície do solo no local da medição, foi construído um abrigo de 2m de altura, que era sombreado por vegetação a leste e a oeste. Os controladores TC-900 e o MT-530 foram organizados e protegidos de intempéries (figura 46). As telhas

do abrigo foram revestidas na parte inferior com papel alumínio para reduzir as trocas de calor com as sondas por radiação.



Figura 46: fotos da instalação dos sensores de temperatura e umidade relativa e de temperatura do solo

Para garantir a profundidade das sondas, elas foram fixadas em um tubo de PVC, através de furos executados nas alturas estipuladas. Desta forma, os sensores NTC ficaram para fora e a fiação percorria seu interior até a superfície. Os termômetros foram protegidos por duas camadas de fita alumínio, que teve sua borda selada com silicone. Para que o registro de temperatura não abrangesse apenas a posição do sensor, foi fixada uma braçadeira metálica que o envolvia, juntamente com o tubo.



Figura 47: fotos dos sensores de radiação solar global, velocidade e direção do vento externo instalados

Uma vez que, na etapa anterior, constatou-se a grande influência do vento externo sobre esta vazão nos dutos e que ele sofre variações abruptas, fez-se o acréscimo de sensores eletrônicos para monitorar sua velocidade e direção, sendo incluídos dois anemômetros de copos e uma

biruta (figura 47). Um destes anemômetros, juntamente com o solarímetro, foi posicionado a 10m do solo através da fixação de um mastro sobre a cobertura da edificação. A direção do vento foi registrada com uma biruta de construção artesanal posicionada acima da cobertura, junto à fachada frontal da edificação, a 7m de altura. O segundo anemômetro de copos foi responsável pelo registro da velocidade do vento junto à boca externa do tubo, a uma altura de 50cm.

As posições foram escolhidas por representar as de menor influência dos fatores externos, tais como a vegetação e as edificações, sobre os sensores. Tomou-se o devido cuidado com a horizontalidade na instalação e os equipamentos foram protegidos de descargas elétricas por um pára-raios.

Não mais se monitorou a temperatura média radiante nos sanitários e na administração, de modo que, esta etapa, dispensou a entrada regular do pesquisador no recinto. Sendo assim, eles passaram a registrar apenas valores de temperatura e umidade relativa do ar, ambos no centro da sala, a 110cm de altura. A primeira sala contava com sensores NTC e higrômetro, enquanto a segunda, com as sondas da BABUC/A® (figura 48).

Foram monitorados quatro (dos seis) tubos com características distintas, resultados da combinação de dois diâmetros (100mm e 200mm) e duas inclinações (ascendente e descendente em relação ao piso da edificação). Os valores de temperatura foram registrados com sensores NTC a 50cm de cada extremidade. A superfície interna dos tubos próxima aos sensores foi revestida com papel alumínio e o sensor foi fixo com uma base de madeira para melhor registrar a temperatura do ar e reduzir a influência das trocas de calor por radiação e condução com paredes do tubo.

A velocidade do ar nos tubos foi registrada com o anemômetro de fio quente no centro a uma distância equivalente a cinco vezes o diâmetro na extremidade interna (ou seja, 50cm no tubo de 100mm e 100cm no tubo de 200mm). Para tanto, foi criado um extensor dos tubos. A verticalidade foi garantida por uma haste de segurar tubos de ensaio com duas presilhas.

As modificações no sistema eram feitas no período noturno, após as 23h, e os registros iniciavam à 1h do dia seguinte. Nesta etapa, os dados de velocidade do vento dos três anemômetros e os de radiação solar foram coletados cada 10s e feita a média cada 12min. Os registros de

temperatura e umidade ocorreram a cada 12min. Como nas etapas anteriores, o ingresso do pesquisador no ambiente nunca era de maneira direta do exterior, ocorrendo pela sala lateral.



Figura 48: foto dos equipamentos instalados nas das salas estudadas

5.3.2.3 Observação do Desempenho Higrotérmico na Sala Ventilada pelo Sistema de Tubos

Uma vez observado e avaliado o comportamento térmico das salas fechadas e do deslocamento geral da circulação de ar no sistema, executou-se uma medição mais prolongada para avaliar as condições de desempenho higrotérmico nos ambientes internos e no externo.

A coleta de dados, nesta etapa, seguiu os mesmos moldes da etapa anterior, permanecendo os sensores nos mesmos locais, porém com tempo de coleta diferenciada. Todos os tubos, juntamente com a chaminé solar, permaneceram abertos e o anemômetro de fio quente era posicionado para avaliar a velocidade do ar de um tubo diferente a cada semana (ao invés de cada dia). Os dados de radiação, direção e velocidade do vento (externa e nos tubos), devido ao limite de memória da controladora BABUC/A®, passaram a ser coletados a cada minuto, e sua média registrada junto com os valores absolutos das demais sondas a cada meia hora.

5.3.3 Tratamento dos dados

Como existem muitas variáveis influenciando o sistema e três controladoras diferentes, houve uma grande quantidade de dados coletados (os dados foram colocados no CD que acompanha o trabalho), fornecidos em diferentes formatos de arquivo. Para facilitar o entendimento do leitor e tratamento, eles foram importados para o programa Microsoft Excel® e organizados em forma de planilhas eletrônicas, nas quais foram contabilizados, tratados estatisticamente e convertidos em gráficos similares. Desta forma, os resultados obtidos pelos três ambientes (dois internos e um externo), puderam ser comparados.

O tratamento estatístico consiste em calcular a média das variáveis nos intervalos previamente descritos e localizar a máxima em alguns períodos. Os gráficos comparados são de desenvolvimento linear ao longo do tempo, de dispersão (cruzando as variáveis influentes com a velocidade do ar no interior dos tubos) e histogramas de temperatura e sentido do fluxo de ar.

5.3.4 Constatações sobre o andamento da pesquisa, o método adotado e os equipamentos utilizados

Ao longo das medições, foram realizadas constatações que se considera importante descrever para facilitar o trabalho de outros pesquisadores, em estudos similares, no futuro. Tais constatações podem ser interpretadas como conselhos ou advertências sobre possíveis problemas a serem encontrados. Considera-se importante serem aqui relatados, pois tiveram forte influência nos resultados obtidos.

A conclusão da obra sofreu atraso. A edificação deveria ter ficado pronta em março de 2005, porém apenas seis meses depois ela possuiu condições mínimas para a instalação dos sensores. Desta maneira, medições *in loco* desenvolveram-se sem os acabamentos da edificação e a pesquisa limitou-se ao período de outubro de 2005 a março de 2006 (período de primavera e verão).

Quanto à preparação do experimento, um bom embasamento teórico sobre métodos de medição ajudou na coleta adequada das grandezas físicas desejadas com a menor quantidade de

interferência possível. Esta etapa bem definida permitiu que os intervalos de tempo determinados para as medições fossem suficientes para a avaliação dos objetivos.

Para a coleta de alguns dados, fez-se necessário a entrada do pesquisador no interior das salas. Com intuito de diminuir a interferência gerada, esse ingresso ocorreu pelas salas centrais, criando assim uma antecâmara, impedindo a troca direta de ar interno com o externo. O tempo de permanência do pesquisador no interior das salas foi o mínimo necessário para a coleta de dados.

Algumas sondas se fizeram necessárias e foram adquiridas ao longo do estudo, resultando que o estudo piloto realizado não contemplou a totalidade das sondas empregadas. Este fato acarretou em problemas decorrentes da instalação e programação dos equipamentos, sendo necessário uma série de deslocamentos até os centros de pesquisa ou locais de assistência técnica para re-configuração. Outro inconveniente atribuído à aquisição de sondas durante o experimento é que a quantidade de informação nas diversas etapas do estudo não é homogênea, dificultando as comparações.

O número de controladoras (no total de três), de gerações tecnológicas diferentes, utilizadas concentradas sobre um equipamento desatualizado, de baixa estabilidade e capacidade de processamento e memória – caso do computador e sistema operacional utilizados – acarretou em várias interrupções, limitando a quantidade e periodicidade dos dados obtidos, e em perdas de dados. Este fato também gerou um esforço dobrado para a redução de erros nos registros, uma vez que, entre outros efeitos, cada controladora apresentava um relógio interno próprio, e eles entravam em descompasso em tempos maiores de medição.

Outro limitador da quantidade de informação adquirida foi a ocorrência de problemas mecânicos na sonda analisadora de ambientes internos (BABUC/A®), possivelmente devido a infiltração de umidade, que encerraram prematuramente o estudo do desempenho térmico dentro das salas, restringindo-o a três semanas.

O uso de equipamentos não dedicados ao monitoramento experimental foi outro problema encontrado, principalmente devido ao grau de exigência dos dados, à falta de informação disponível em manuais e à inexistência de suporte técnico. Entre os equipamentos, a sonda analisadora de ambientes internos BABUC/A® se mostrou a mais adequada para a execução do

experimento, pois não requer um acompanhamento constante, apenas visitas de rotina para a reposição da água destilada no psicrômetro e a limpeza das demais.

A existência de um único anemômetro de fio quente também dificultou a comparação dos dados coletados, pois determinou que a coleta de dados da velocidade do ar dentro de cada tubo fosse executada em dias diferentes. Também não se encontrou meios técnicos e financeiros compatíveis para se monitorar o sentido do fluxo no interior dos tubos eletronicamente, sendo ele restrito ao período onde o pesquisador permaneceu junto ao Protótipo Ventura, durante o dia e em períodos a cada 30 minutos.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo, além de apresentar os dados coletados no interior e exterior do protótipo, tem por objetivo analisar e discutir os resultados obtidos no período. O capítulo está dividido conforme o enfoque e o tratamento dos dados obtidos.

6.1 DADOS EXTERNOS MÉDIOS MEDIDOS NO PERÍODO ESTUDADO

A seguir serão apresentadas as médias mensais, no período, dos dados coletados junto ao Protótipo Ventura e comparados aos registrados no 8º Distrito de Meteorologia em Porto Alegre. As medições foram iniciadas à meia noite do dia 21 de outubro de 2005 e transcorreram até às 12h do dia 11 de março de 2006.

O período englobado no estudo corresponderia a um total de 3.394 horas de leitura, porém, devido a pausas, foi medido um total de 2.220 horas, distribuídas de forma desigual entre os meses, sendo 115 horas entre os dias 21 a 31 de outubro, 192 horas entre os dias 2 a 9 e 25 a 30 de novembro, 464 horas entre os dias 1 a 22 e 29 de dezembro, 525 horas entre os dias 4 a 31 de janeiro, 672 horas entre os dias 1 a 28 de fevereiro e 251 horas entre os dias 1 a 11 de março. Devido a esta perda de dados não é possível caracterizar os meses, mas é possível, sim, apresentar um panorama geral dos dias estudados. Os dados do 8º Distrito foram coletados e aqui dispostos de forma contínua e ininterrupta.

6.1.1 Radiação solar global (total)

Foi realizada a medição da radiação solar global (direta e difusa) recebida por hora, sobre o plano horizontal, junto ao Protótipo Ventura. A radiação solar global é uma característica que varia muito de acordo com a posição do local, devido à grande variação de nebulosidade e às características das superfícies envolventes.

Observa-se na figura 49 que, em geral, os dados coletados no Vila Ventura se apresentam aproximadamente 50Wh/m^2 inferiores aos registrados no 8º Distrito Meteorológico no mesmo período, possivelmente devido à vegetação abundante e elevada próxima ao protótipo. A exceção ocorre no mês de dezembro, no qual essa diferença passa a ser 115Wh/m^2 superior. Isso se justifica pelo fato dos estudos realizados, neste mês, terem selecionado exclusivamente os dias de sol.

Os dados coletados pelo 8º Distrito demonstram que os meses de dezembro e janeiro foram atípicos, pois receberam uma intensidade de radiação solar abaixo do esperado e menor que os meses de novembro, fevereiro e março, junto ao 8º Distrito de Meteorologia. Estes meses, além de serem tradicionalmente mais ensolarados devido à pequena inclinação relativa ao sol do eixo terrestre são caracterizados em séries históricas por apresentarem nebulosidade inferior à dos meses anteriormente mencionados (UBER, 1992).

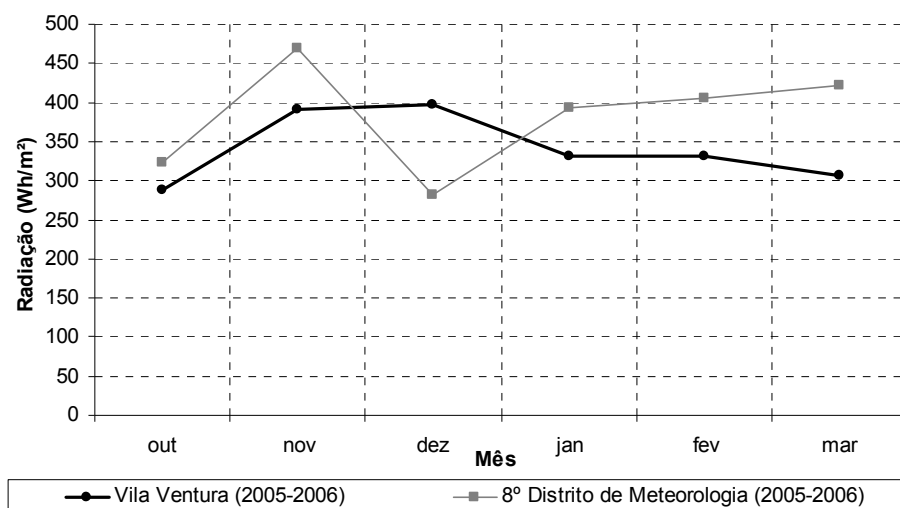


Figura 49: gráfico da radiação solar global média mensal junto ao Protótipo Ventura e ao 8º Distrito de Meteorologia (2005-2006)

6.1.2 Velocidade e direção do vento

Junto ao protótipo, as velocidades médias dos ventos registradas são menores que àquelas encontradas no 8º Distrito de Meteorologia. Isso já era esperado devido à interferência de uma

série de fatores, entre os quais podem ser citados: a influência da topografia, das massas vegetais e das edificações no entorno, bem como da altura de medição. O valor médio calculado no Vila Ventura foi de 0,46m/s, sendo que a velocidade média mais elevada foi no mês de dezembro (0,82m/s), como visto na figura 50.

Assim como já observado por Uber (1992), na região de em Porto Alegre, o vento é caracterizado por ciclos diários onde ocorre uma queda na velocidade do vento pela madrugada e manhã, seguida de um incremento até o fim da tarde onde atinge seu pico. O valor máximo de velocidade do vento ocorreu no dia 4 de novembro às 20 horas.

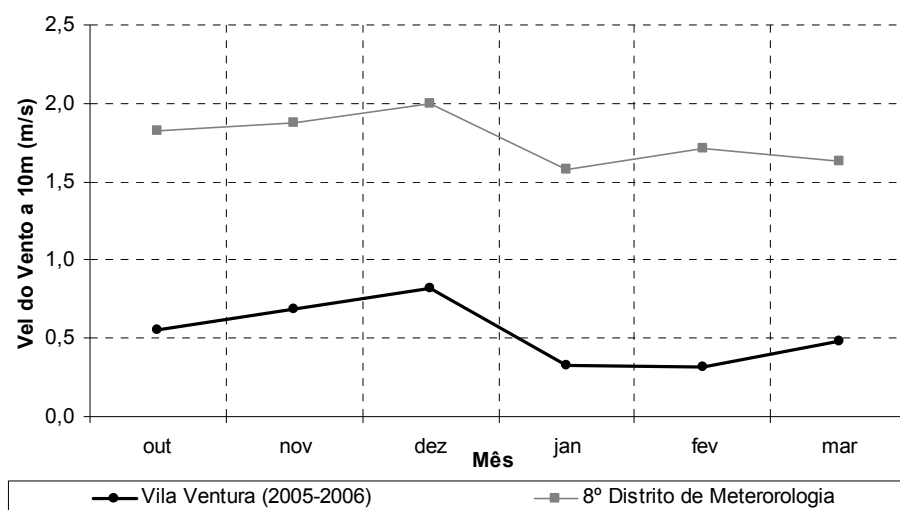


Figura 50: gráfico da velocidade do vento média mensal junto ao Protótipo Ventura e ao 8º Distrito de Meteorologia (2005-2006)

Embora os ventos de Porto Alegre sejam predominantes do quadrante leste e sudeste, junto ao Protótipo Ventura foi predominante do quadrante norte. É possível explicar o ocorrido pelos mesmos motivos que influenciam na velocidade do vento. O registro dessa divergência é de grande valia, pois sem dados gerais da direção do vento atmosférico, não seria possível um estudo mais aprofundado da influencia da ventilação natural sobre o deslocamento de ar dentro dos tubos.

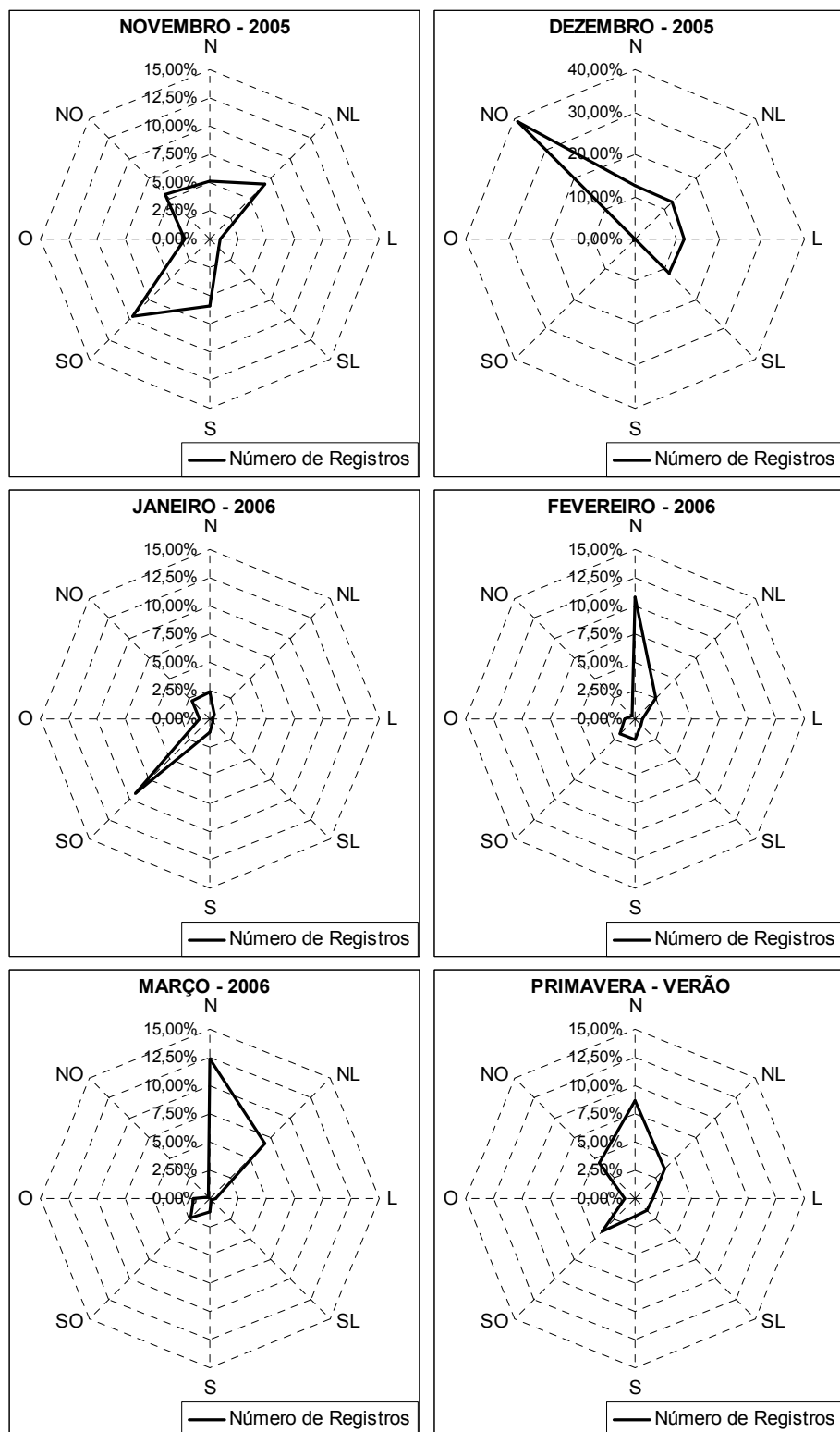


Figura 51: gráfico da direção dos ventos mensal junto ao Protótipo Ventura (2005-2006)

Nos gráficos da figura 51, é possível visualizar com clareza a direção dos ventos predominantes no local, em cada um dos meses de medição. Observa-se que a maioria dos meses é caracterizada por períodos de calmaria (velocidades do vento menores que 0,5m/s, nos quais a biruta registra valores nulos de direção), à exceção do mês de dezembro, onde ocorre uma predominância de ventos de noroeste. Outra constatação é a baixíssima frequência de registros provenientes de leste, possivelmente devido a uma grande massa vegetal (bambuzal) localizada a, aproximadamente, 5m desse quadrante da edificação. À exceção de novembro, os demais meses são caracterizados por uma grande constância de ventos provindos da mesma direção. Deve-se salientar que a biruta é de fabricação caseira e sua precisão é baixa, além de cobrir apenas oito quadrantes.

6.1.3 Temperatura do ar

No gráfico da figura 52 são apresentados os valores médios mensais de temperatura do ar, junto ao Protótipo Ventura e no 8º Distrito de Meteorologia durante o período estudado.

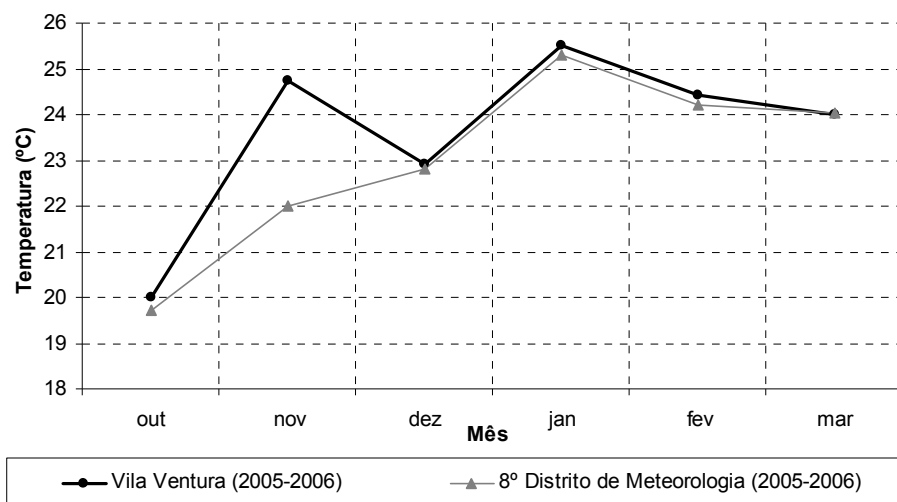


Figura 52: gráfico da temperatura do ar média mensal junto ao Protótipo Ventura e ao 8º Distrito de Meteorologia (2005-2006)

Ocorreu uma equivalência dos valores registrados ao longo do período, a exceção do mês de novembro, que se mostrou com temperaturas superiores. Essa diferença já era esperada, devi-

do ao registro manual de temperatura do ar ter ocorrido apenas durante o dia (excluindo a noite). A média de temperatura do ar no período foi de 23,8°C. O mês de janeiro apresentou o valor médio de temperatura mais elevado, com 25,5°C, como esperado para Porto Alegre e arredores. Analisando os dados detalhadamente, observou-se que o período mais quente ocorreu entre os dias 6 e 16 de janeiro, quando a média dos valores manteve-se em 29,5°C e os valores máximos chegaram às marcas de 41,2°C e 40,4°C, às 17 horas, do dia 8 e do dia 10 de janeiro, respectivamente.

6.1.4 Umidade relativa do ar

Os valores registrados para a umidade relativa do ar externo, junto ao Protótipo Ventura, passaram a ser registrados às 19 horas do dia 3 de dezembro de 2005. As médias mensais se apresentam, em média, 12% maiores do que as registradas no 8º Distrito de Meteorologia, e este comportamento é uniforme durante o período (figura 53). A média foi de 81,5%. O mês de janeiro apresentou o valor médio mais elevado, com 84,7%, diferente do esperado para Porto Alegre e arredores, pois em séries históricas registradas pelo 8º Distrito de Meteorologia e apontadas no trabalho de Uber (1992), este mês é tipicamente o mais seco do ano juntamente com dezembro.

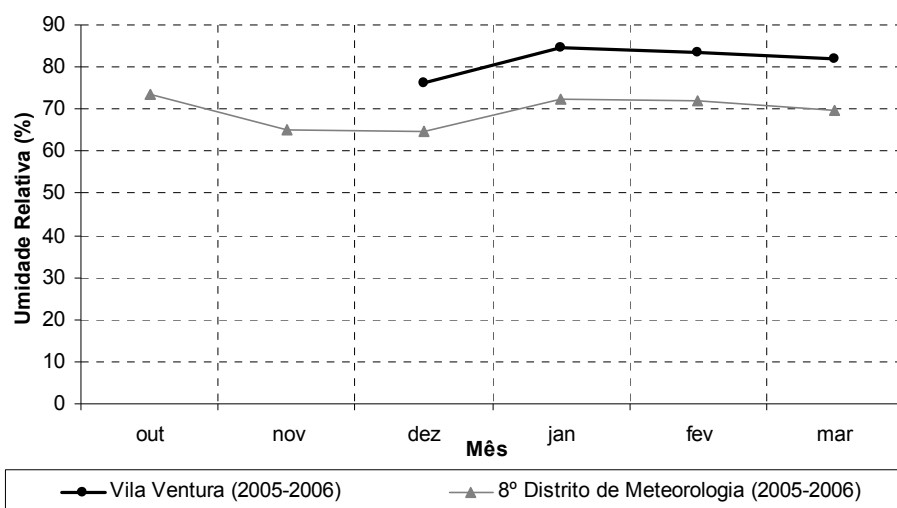


Figura 53: gráfico da umidade relativa do ar média mensal junto ao Protótipo Ventura e ao 8º Distrito de Meteorologia (2005-2006)

6.1.5 Temperatura do Solo

Conforme caracterizado por Streck et alli (2002), o solo de Viamão/RS apresenta um relevo suavemente ondulado, composto por granitos e magmáticos nos declives e partes mais altas das ondulações e por depósitos sedimentares recentes nas planícies aluviais.

Foi executada por Vaz e Sattler (2004) uma análise da distribuição de temperaturas nas camadas mais superficiais do solo do município de Viamão, a partir de séries históricas de temperaturas, registradas pela FEPAGRO, para as profundidades de 5cm, 10cm, 15cm, 30cm e 50cm, durante oito anos.

O estudo mostra uma distribuição anual de temperaturas do solo segundo a profundidade oscilando com formato senoidal, em torno do valor médio de $21,6^{\circ}\text{C}$ e amplitudes que chegam a $7,5^{\circ}\text{C}$, logo abaixo da superfície, diminuindo para valores desprezíveis, a 6 metros de profundidade e tornando-se praticamente nula nas profundidades em torno de 12 metros.

No estudo, a defasagem do ciclo térmico anual (característico à profundidade de 50cm), relativa ao ciclo na profundidade de 5cm (superfície), foi próxima a 11 dias. Isto significa que as variações na superfície do solo só se fazem sentir a 50cm de profundidade por volta de 11 dias depois e de forma amortecida. Segundo o estudo, para os ciclos diários, a expectativa é que as variações em torno da temperatura diária média se façam sentir, no máximo, a até 40cm de profundidade.

Os autores colocam ainda que, considerando os fenômenos de amortecimento e defasagem dos eventos térmicos nas camadas profundas em relação à ocorrência na superfície, o subsolo na região apresenta potencial de receber calor durante o dia e transmitir esta energia armazenada ao ambiente durante a noite. Sendo assim, o solo se mostra capaz de funcionar como um reservatório inercial de energia renovável e limpa, naturalmente disponível para aproveitamento no atendimento de necessidades energéticas da comunidade.

Da mesma forma que o observado pelos autores acima citados, os dados coletados mostraram que a temperatura média do subsolo do município de Viamão apresenta valores inferiores à média das temperaturas máximas e superiores à média das temperaturas mínimas no ar ambiente, mesmo a pequenas profundidades. Nos gráficos das figuras 54 e 55, vemos o comportamento da temperatura do ambiente e do solo, em diversas profundidades. Como era de se es-

perar, à medida que aumentamos a profundidade, a oscilação diária de temperatura passa a ser cada vez menos observada, de modo que à profundidade de 1 metro, a temperatura se apresenta bastante constante e próxima à média de 22,9°C.

É importante ressaltar que, embora as amplitudes máximas a partir dos 50cm de profundidade sejam similares (apresentada no gráfico 53 à direita), elas são de característica diferentes, pois a pequenas profundidades essa variação ocorreu várias vezes ao longo do período, enquanto que a profundidades maiores (a partir dos 2 metros), ela representa praticamente o aquecimento sofrido pelo solo em todo o período de verão.

Observamos que, na profundidade de 5cm, a resposta do solo à variação térmica é diária. Nas profundidades de 50cm, essa variação passa a acompanhar períodos de oscilação e é influenciada por entradas de frentes de calor e de frio. A 1m, o comportamento é similar à profundidade anterior, porém ocorre de maneira mais amortecida. A 2m e 3m, as perturbações são sentidas apenas em momentos pontuais de chuvas extremas e se apresentam crescentes até o final do período. Essa característica demonstra o seu retardo térmico, pois o mês de março representa a entrada do outono e a temperatura ambiente se encontra em declínio.

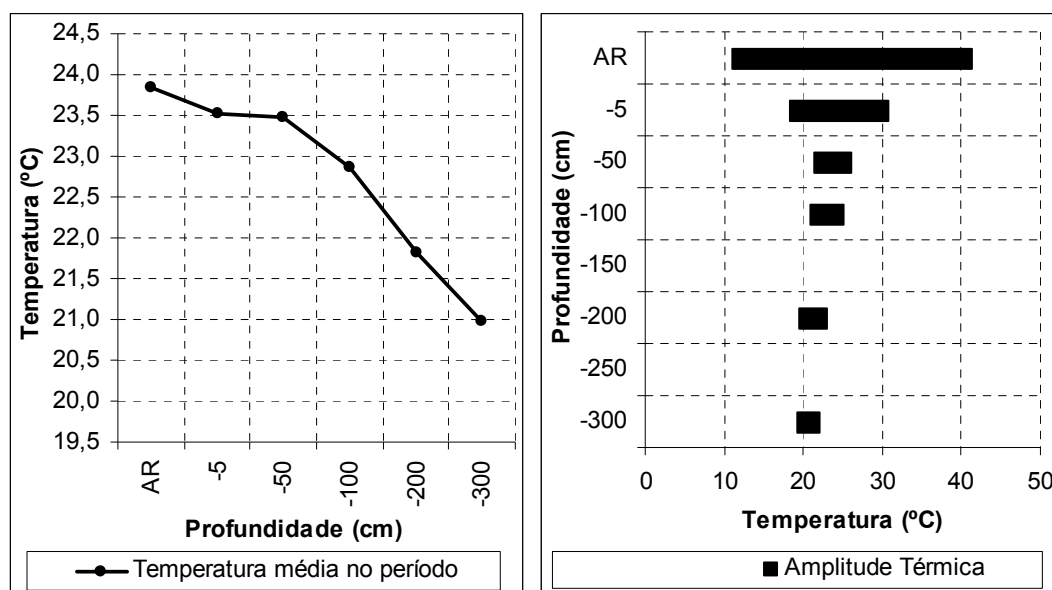


Figura 54: gráfico da temperatura do ar e do solo média (esquerda) e amplitude máxima (direita) registrada junto ao Protótipo Ventura (2005-2006).

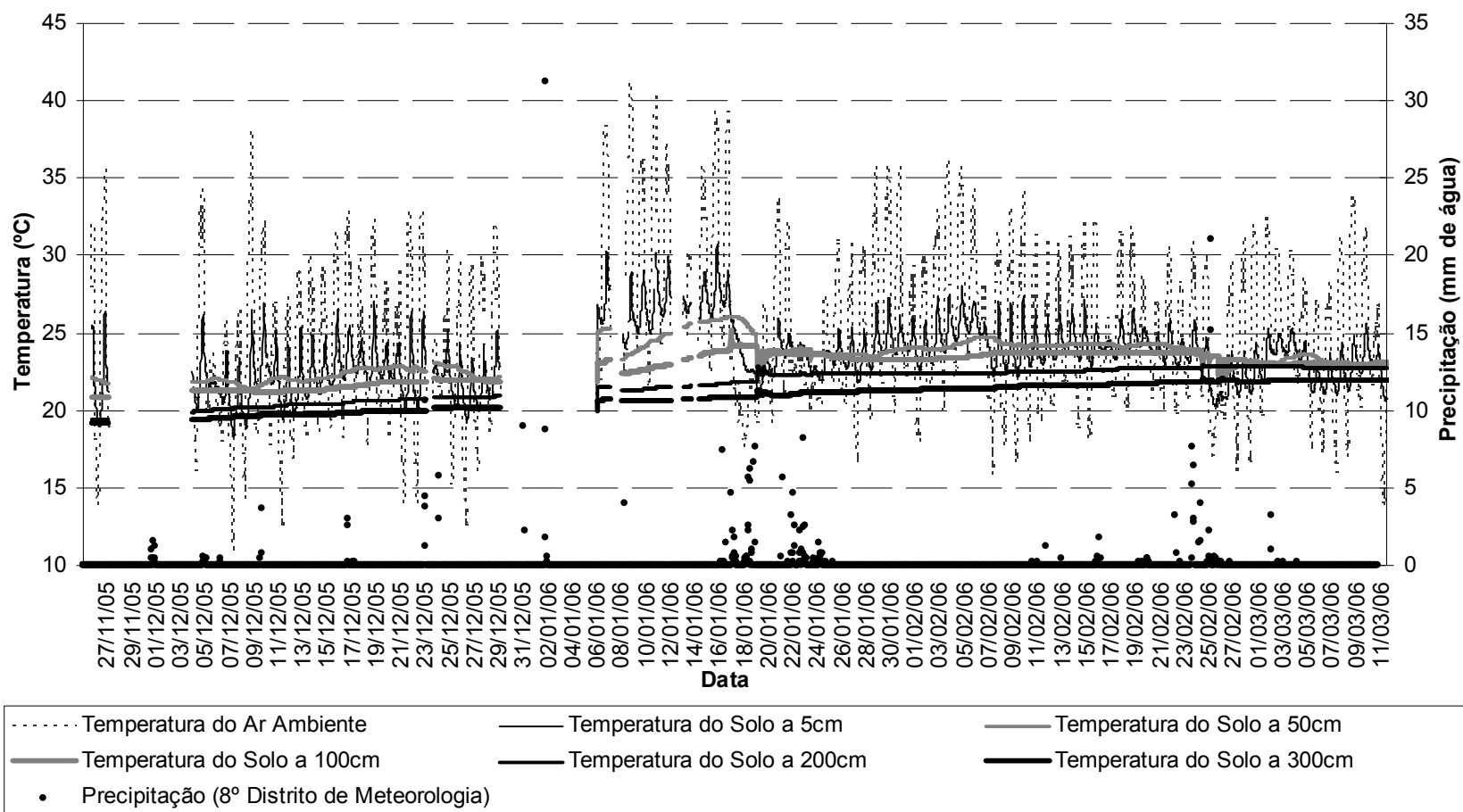


Figura 55: gráfico de temperatura do ar e do solo (a diversas profundidades) e precipitação no período (2005-2006)

Embora bastante constante, a temperatura em profundidades elevadas demonstrou, no decorrer do período, algumas oscilações bruscas. Esse fenômeno se deve à ação da chuva sobre o solo. A chuva, à medida que penetra no solo tende a homogeneizar a temperatura. No caso do verão, refrigera as camadas menos profundas e aquece as mais profundas. É possível observar essa afirmação, claramente, entre os dias 18 e 20 de janeiro e 25 e 27 de fevereiro, quando ocorreram precipitações com volumes consideráveis de água. Chuvas mais intensas geraram oscilações em camadas mais profundas.

6.2 COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DOS AMBIENTES

Os ambientes com as esquadrias e tubos fechados foram medidos nos dias 21 e 27 a 31 outubro e o dia 2 de novembro de 2005. No total foram feito 260 registros, a cada meia hora, não contínuos. O período monitorado foi caracterizado por radiação solar variável, com alguns dias ensolarados e outros nublados. O vento externo apresentou um comportamento cíclico regular ao longo dos dias com predominância de calmaria durante a noite e rajadas durante o dia. Sua velocidade média foi de 0,61m/s, com rajada máxima de 2,65m/s (figura 56).

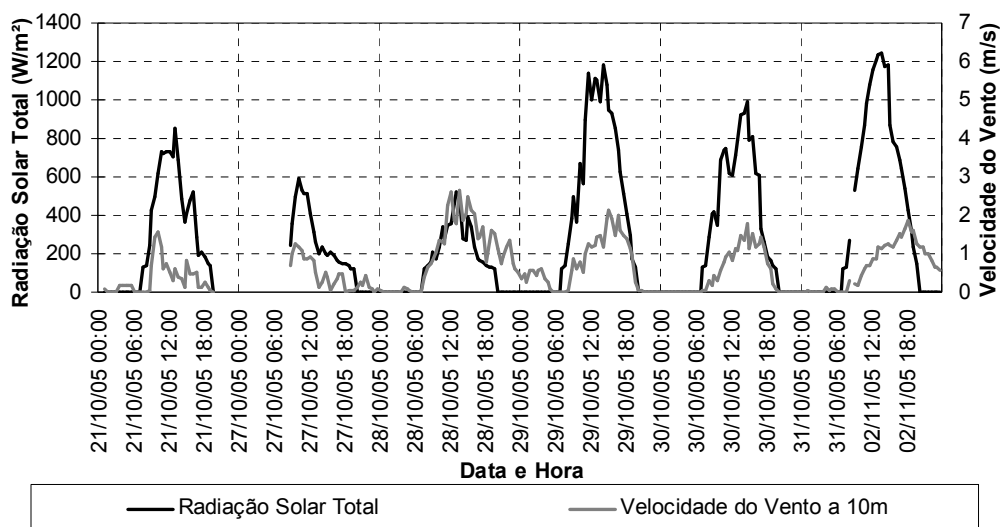


Figura 56: gráfico da radiação solar total (global) e velocidade do vento a 10 metros de altura

Na figura 57, vemos que os dias com sol correspondem àqueles com maior amplitude térmica do ar externo, evento típico da primavera, diferente dos dias nublados, que apresentaram baixas variações. As temperaturas dos ambientes estudados apresentaram um padrão senoidal similar ao longo do dia, com um retardo térmico médio, no período, de cinco horas.

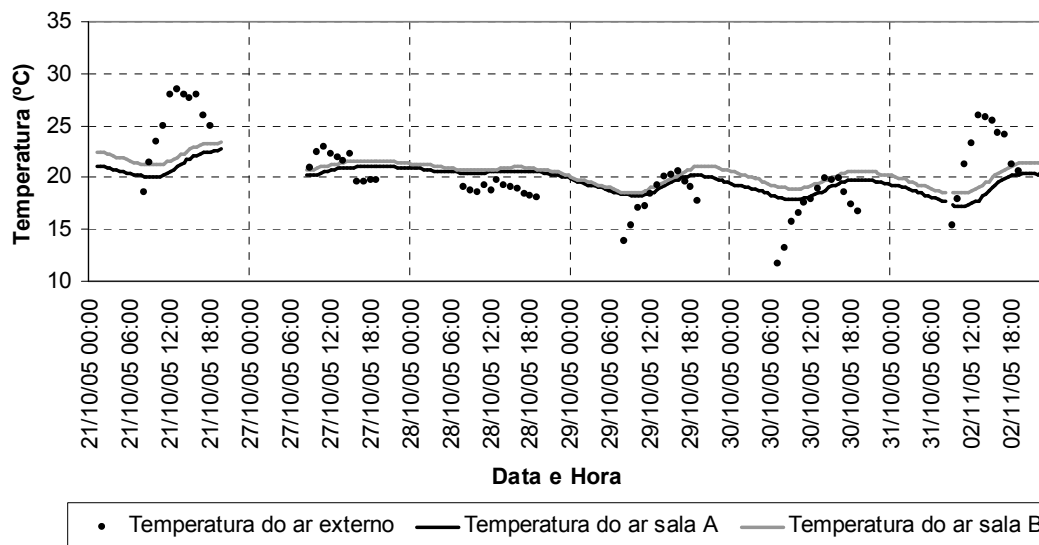


Figura 57: gráfico da temperatura do ar externa e interna

A temperatura do ar externo, no período diurno, teve média de 20,4°C com mínima de 11,6°C e máxima de 28,4°C. Na Sala A, a temperatura média do ar foi de 19,8°C enquanto que na Sala B, de 20,5°C. Nos dias nublados, as temperaturas do ar dos ambientes se mostraram bastante próximas, com diferença média de 0,4°C. Já nos dias ensolarados, as diferenças aumentaram para 1,0°C em média, sendo a máxima de 1,5°C.

Tabela 12: diferença de temperatura média entre as salas e grau de correlação de Pearson

	Diferença média (°C)	Correlação de Pearson
Totalidade dos dias	0,73	0,954
Dias ensolarados	0,99	0,980
Dias nublados	0,39	0,995

Através do recurso estatístico do Teste-T, de duas amostras em par, em relação à média, a alta correlação de Pearson permite concluir que o comportamento da Sala A é similar ao da Sala B, sendo possível ser descrito pela temperatura do ar da primeira acrescida da média da diferença para cada situação de nebulosidade, como mostra na tabela 12. A correlação de Pearson é o fator que determina a significância dos resultados comparativos com esse teste. Seus valores variam de 0 a 1 e níveis acima de 0,9 são tidos como significativos.

A umidade relativa média da Sala A foi de 87,4% e da Sala B foi de 85,6%. Essa diferença de 1 ponto percentual se manteve durante praticamente todo o período, oscilando entre 79% e 91%. É necessário comentar que, tanto as faixas de oscilação quanto as médias são elevadas, uma vez que não ocorreu chuva no período e que o diagrama bioclimático para edificações sugerido por Givoni (1992) identifica como limite superior a umidade relativa de 80% para o conforto.

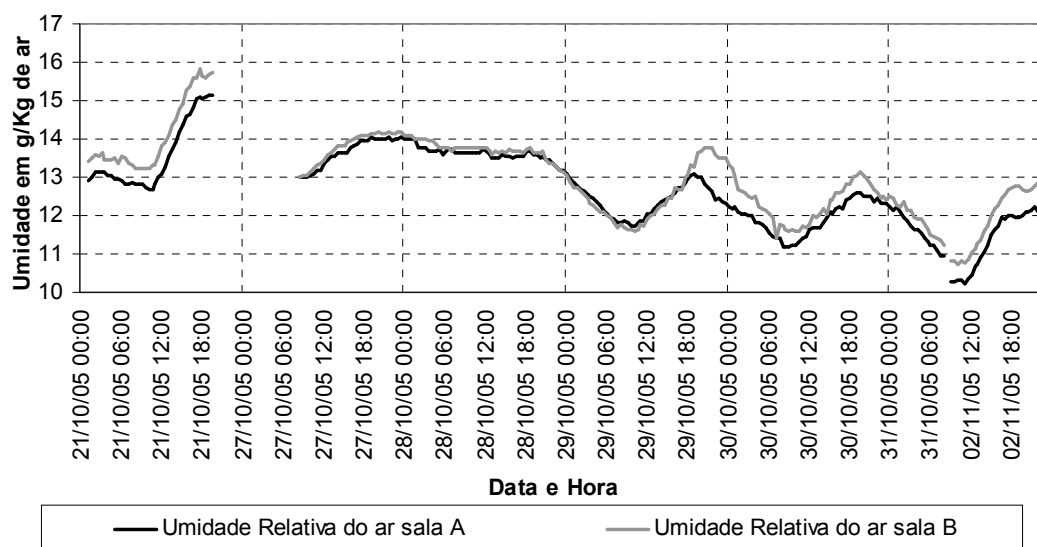


Figura 58: gráfico da umidade absoluta do ar interna

Essa elevada umidade relativa foi constatada mesmo no dia de maior calor e pode ser atribuída a dois fatores: ao contato contínuo das paredes da edificação com o solo, uma vez que ela se encontra “encostada” no talude e ao início do experimento no dia seguinte à conclusão da obra, com as paredes sem acabamento final. A umidade elevada aumenta consideravelmente o desconforto e, combinado à alta temperatura e à carência de ventilação, é a principal causa de

desconforto térmico (MASCARÓ et alli, 2001). Embora a umidade relativa da sala A seja maior, a Sala B se apresenta mais úmida em valores absolutos, como visto na figura 58. A média de umidade absoluta registrado na sala A foi de $12,7\text{g/kg}_{\text{ar}}$ e da sala B, de $13,0\text{g/kg}_{\text{ar}}$.



Figura 59: fotos do Protótipo Ventura tiradas a cada hora do dia 30 de outubro de 2005

No dia 30 de outubro, juntamente com as medições, foram tiradas fotos, a cada hora, para uma melhor avaliação da insolação sobre o protótipo. As fotos demonstram que a Sala B (sala

mais da direita) recebe mais insolação que a Sala A (mais da esquerda), inclusive durante o período da manhã, devido à massa vegetal localizada ao leste (fotos da figura 59).

6.2.1.1 Primeiras Observações sobre o Funcionamento Geral do Sistema de Ventilação Natural por Tubos Enterrados

Com a abertura de todo o conjunto de tubos e da chaminé solar da Sala A, foi possível observar o comportamento geral da circulação de ar e monitorar a temperatura e a velocidade do ar no interior dos tubos. As medições foram realizadas nos dias 3 e 4 de novembro de 2005. No total, foram feitos 85 registros contínuos, a cada meia hora.

Como visto na figura 60, o período monitorado foi caracterizado por radiação solar intensa, com baixa nebulosidade, atingindo valores de 1200 Wh/m^2 . O vento externo apresentou um comportamento cíclico regular ao longo dos dias, com predominância de calmaria durante a noite e rajadas durante o dia. Sua velocidade média foi de $0,7 \text{ m/s}$, com rajada máxima de $2,7 \text{ m/s}$ às 17 horas do segundo dia.

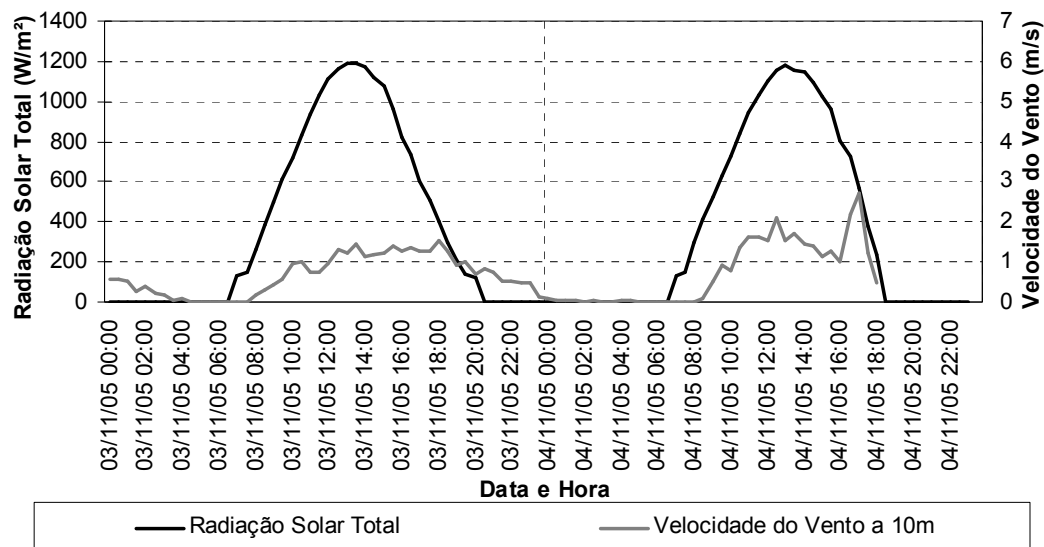


Figura 60: gráfico da radiação solar total (global) e velocidade do vento a 10 metros de altura

Na figura 61, vemos que a temperatura do ar externo atingiu valores de até 32,6°C com média (para valores entre as 8 e 19 horas) de 25,8°C. No interior de ambas as salas, a temperatura do oscilou, alcançando 21,1°C, na Sala A, e 21,9°C, na Sala B. Como observado, a diferença de 1,0°C, em média, registrada no momento em que as salas estavam fechadas, diminuiu para 0,8°C.

Outra constatação é que, ao final do período, as temperaturas internas do ar das duas salas praticamente se igualaram, visto que, por um período de 4 horas, suas diferenças não ultrapassaram 0,3°C. Este evento, como será visto posteriormente, é resultante do sentido de deslocamento do ar no interior dos tubos. O retardo térmico médio de ambas as salas, porém, permaneceu de cinco horas.

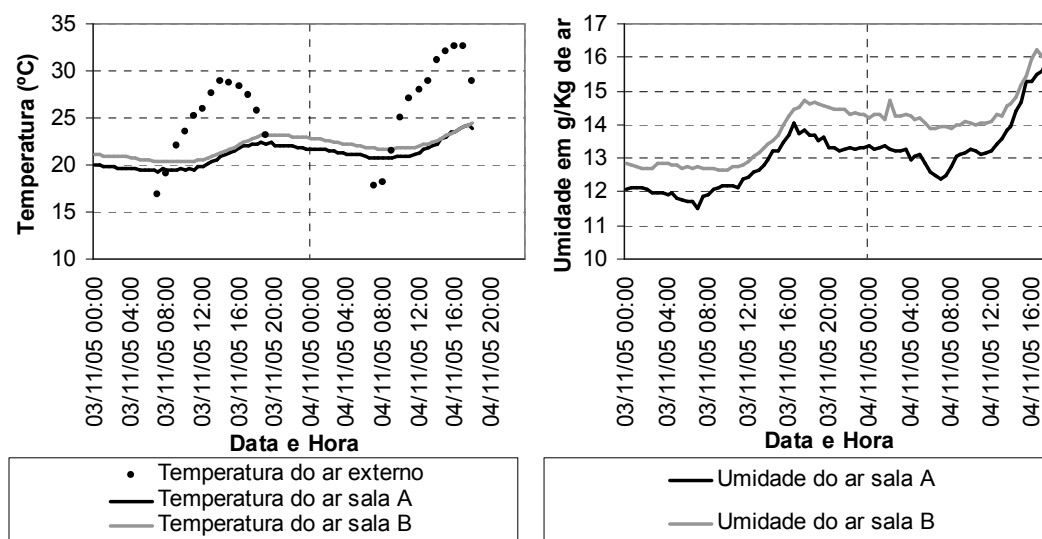


Figura 61: gráfico da temperatura do ar (esquerda) e umidade absoluta do ar (direita), externo e interno

A umidade relativa média das salas permaneceu elevada e acima do limite de 80%. Na Sala A, a média foi de 83,0% e na sala B de 82,0%. Ambas oscilaram aproximadamente 3,3% em torno da média.

Embora as médias de umidade absoluta tenham aumentado para 13,06g/kg_{ar}, na sala A, e 13,90g/kg_{ar}, na Sala B (figura 60 à direita), a diferença entre elas aumentou de 0,3g/kg_{ar} para 0,8g/kg_{ar}. A baixa quantidade de registros não permite uma conclusão, mas indica que a venti-

lação gerada pelo sistema empregado contribui na diminuição da umidade interna, fator que será mais bem avaliado nos estudos seguintes.

Foi observado que o fluxo de ar no interior dos tubos é, na maioria dos casos, para dentro e inferior a 0,2m/s (valores positivos do gráfico da figura 62).

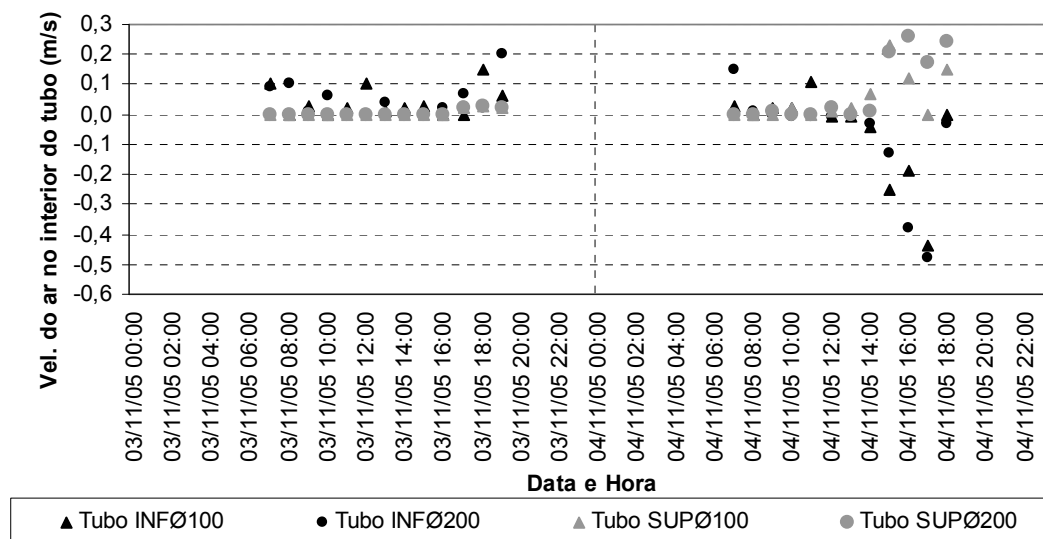


Figura 62: gráfico da velocidade do ar no interior do tubo (obs.: valores negativos de velocidade do ar indicam sentido do fluxo saindo da edificação através dos dutos)

Apenas no final do período, a partir das 14 horas do dia 4 de novembro, a velocidade do vento no interior do tubo aumenta e a direção de seu fluxo passa a ser dispersa. Neste curto período, os tubos superiores, independentemente do diâmetro, mantiveram o fluxo para dentro e velocidades de até 0,3m/s, enquanto os tubos inferiores apresentaram fluxo para fora e velocidades superiores aos anteriores, atingindo 0,5m/s. Esta relação, da inclinação com a velocidade e com o sentido do fluxo do ar dentro dos tubos, demonstrou-se válida e possivelmente influenciada pela direção do vento externo em estudos descritos adiante.

Embora nesta etapa não tenha sido encontrada relação entre a velocidade do ar externo ou da diferença de temperatura com a velocidade do ar interno aos tubos, estas relações se mostraram válidas em estudos detalhados adiante.

A temperatura nos extremos interno e externo dos tubos é geralmente próxima à temperatura do ar da sala e da temperatura do ar externo respectivamente. Desta forma, conforme visto na figura 63, a diferença de temperatura do ar, entre as extremidades dos tubos e do exterior e do interior apresenta um comportamento que tende a ser similar ao longo do tempo.

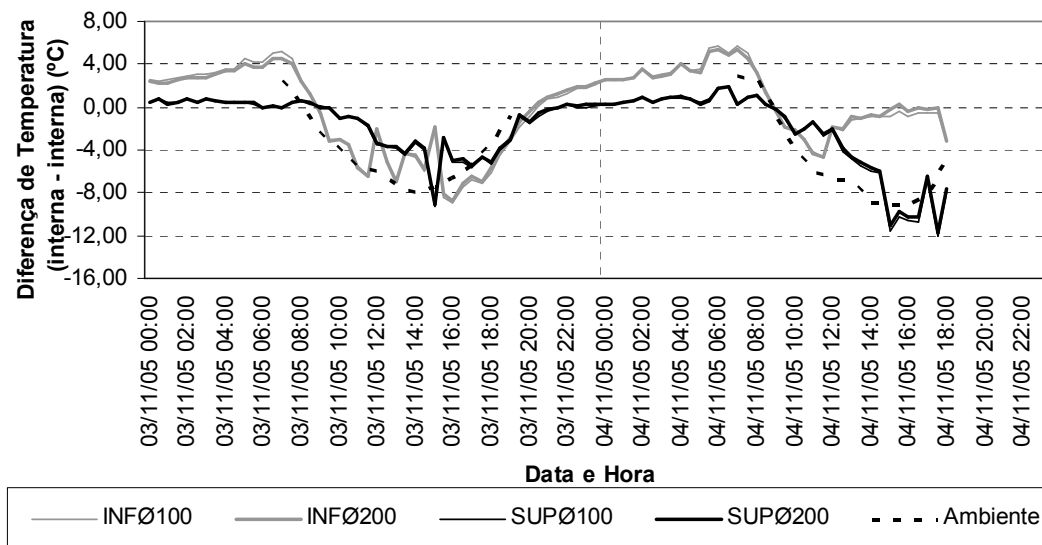


Figura 63: gráfico da diferença de temperatura entre as extremidades interna e externa dos tubos e superior e inferior da chaminé solar

Durante o período, ocorrem exceções, sendo a de maior duração a ocorrida a partir das 14 horas do dia 4 de novembro, para os tubos inferiores. Comparando simultaneamente as figuras 62 e 63, vemos que ela ocorre justamente quando os valores de velocidade do ar são altos e negativos (sentido para fora). Este fato justifica o aquecimento da Sala A, relativo à temperatura da Sala B, descrita anteriormente, uma vez que temos uma grande vazão de ar saindo da edificação pelos tubos inferiores e uma pequena entrando pelos tubos superiores.

Embora não tenhamos os dados do solo no período, é possível fazer especulações para o entendimento do fenômeno, baseado nas séries históricas apresentadas por Vaz e Sattler (2004). No nosso entendimento, o fato ocorre, pois estamos retirando ar refrigerado da edificação a aproximadamente 22°C e extraindo pelo tubo. O solo, por estar a uma temperatura próxima à da edificação, não troca calor com esse ar em deslocamento, de modo que refrigeramos a porção externa dos tubos inferiores. Como a velocidade do ar nos tubos inferiores é maior que a dos superiores, o ar que está penetrando na edificação, possivelmente, pelas frestas e pela

chaminé solar gera o aquecimento interno verificado no mesmo período e observado na figura 61 à esquerda.

Observamos com esta etapa que o comportamento da temperatura do ar das salas, enquanto fechadas, é similar ao longo do tempo. Ambas as temperaturas internas ficaram dentro da faixa de conforto sugerida por Givoni (1992), o que é indicativo de que as estratégias de arquitetura bioclimática adotadas resultaram positivas. A Sala B manteve-se em média 1°C mais aquecida, nos dias de sol, que a Sala A. O retardo térmico de ambas as salas foi de 5 horas. A umidade das salas (relativa e absoluta) é elevada para os padrões de conforto, sendo a Sala B, em média, 0,3g/kg_{ar} mais úmida que a Sala A.

Com a abertura dos tubos, a diferença média de temperatura do ar, para dias de sol, diminuiu para 0,8°C, demonstrando o aquecimento da Sala A, em relação a B. O retardo térmico das salas, porém, manteve-se inalterado. Já a diferença de umidade teve um aumento, de 0,3g/kg_{ar} para 0,8g/kg_{ar}, indicando uma melhora nas condições de umidade na sala ventilada. O fluxo de ar apresentou baixa velocidade e predominância de sentido para dentro na maioria do período. A exceção ocorreu no final do segundo dia, quando ocorreram as maiores velocidade e fluxo para fora, nos tubos inferiores, acarretando em um aquecimento significativo da Sala A em relação a B, ao ponto de ambas apresentarem temperaturas similares.

Quanto ao monitoramento, ficou clara a influência acentuada da velocidade e direção do vento externo na velocidade e sentido do fluxo de ar no interior dos tubos, exigindo outras sondas para registro dessas grandezas e intervalo entre registros diferenciados. Viu-se também a necessidade de registros no período noturno, de temperatura e umidade do ar, além da temperatura do solo, o que exigiria novas controladoras eletrônicas.

6.3 OBSERVAÇÃO DOS FATORES INFLUENTES NA CIRCULAÇÃO DE AR NO INTERIOR DOS DUTOS

O objetivo deste estudo é buscar compreender as grandezas físicas influentes no deslocamento do ar no interior do sistema, com o estudo separadamente de cada tubo. No total foram executados 872 registros, a cada 12 minutos, em dias não contínuos. Foram medidos os dias 10 a 14 e 20 a 22 de dezembro de 2005 e o dia 13 de janeiro de 2006.

Em um primeiro momento, são expostos os valores registrados de maneira cronológica para, em seguida, os dados serem arranjados sob gráficos de dispersão, mais elucidativos, para observar os resultados e comparações.

6.3.1 Dados Climáticos do Período

A radiação solar global no período foi alta, registrando média de $445,5 \text{ Wh/m}^2$, e chegou a valores da ordem de $1441,4 \text{ Wh/m}^2$, às 14 horas do dia 11 de dezembro.

O vento externo medido a 10 metros de altura, apresentou velocidade média de $0,8 \text{ m/s}$ e manteve o comportamento cíclico ao longo dos dias com predominância de calmaria durante a noite de e rajadas durante o dia. Como visto no gráfico da figura 64, os cinco primeiros dias apresentaram as maiores velocidades, sendo a máxima atingida de $4,8 \text{ m/s}$, às 13h36min do dia 10 de dezembro de 2005.

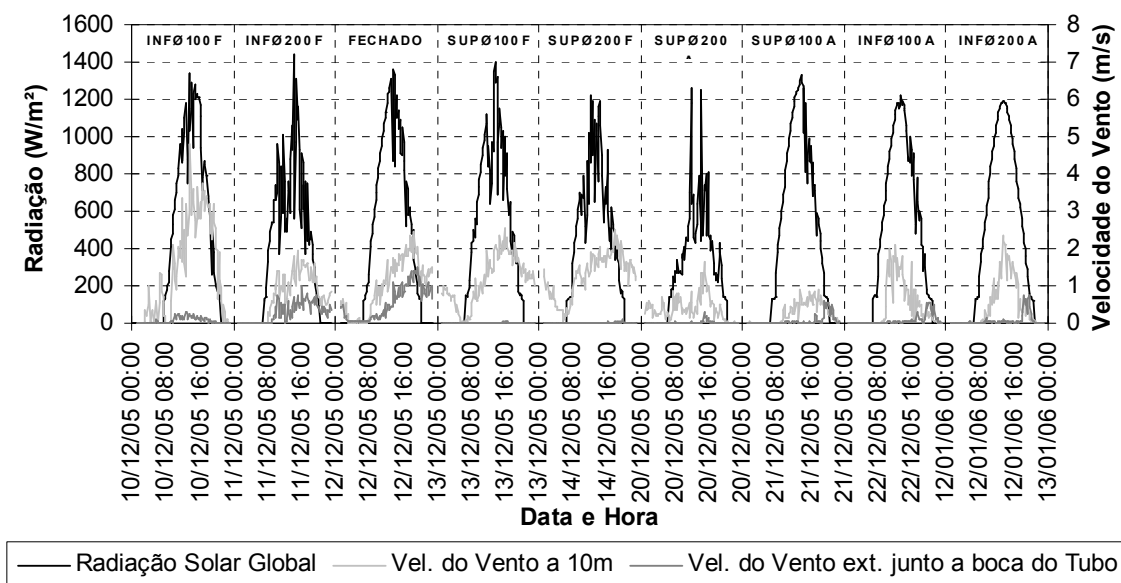


Figura 64: gráfico da radiação solar total (global) e velocidade do vento a 10 metros e 0,5 metros

A velocidade do vento externo a 0,5m do solo, junto à extremidade externa, mostrou-se diferenciada para os tubos superiores e inferiores. No conjunto de tubos superiores, a velocidade

média foi de 0,12m/s e a máxima de 1,5m/s foi obtida às 16 horas, do dia 11 de dezembro. Já os tubos superiores apresentaram média de 0,02m/s, com máxima registrada de 0,58m/s às 19h24min do dia 21 de dezembro. Pode-se observar no mesmo gráfico que os valores de velocidade do vento, junto à boca do tubo, não são proporcionais aos registrados a 10 metros de altura, em todo o período. Uma vez que a posição do primeiro é mais influenciada pelos obstáculos ao redor do que o segundo, essa relação é proporcional apenas para situações de orientação de vento favorável (lembrando que a orientação dos tubos superiores é sul-sudeste e a dos tubos inferiores é norte).

Na figura 65, observamos a variação de temperatura externa e interna ao longo do tempo. Durante os dias medidos, a temperatura média do ar externo foi de 23,6°C, com mínima de 12,3°C, e máxima de 39,7°C. Os dias 22 de dezembro de 2005 e 12 de janeiro de 2006 foram os de maior temperatura externa. A temperatura do ar da Sala A se manteve durante todo o período inferior à da Sala B, sendo a média da primeira de 23,8°C e da segunda de 25,2°C.

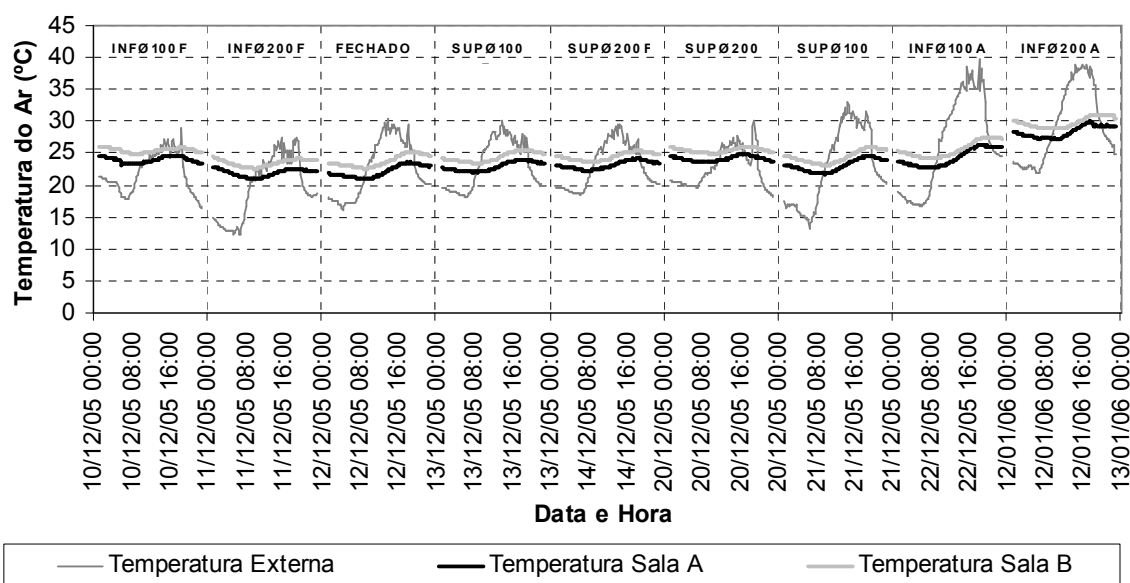


Figura 65: gráfico da de temperatura do ar externa e interna

A umidade relativa externa no período apresentou grande oscilação, principalmente devido à variação térmica diária. A umidade relativa média foi de 71,4%, porém na totalidade dos dias foram registrados valores superiores a 90,0% e inferiores a 51,0%. Nas salas, a umidade relativa apresentou uma oscilação bem menor, não variando mais de 10% durante os dias. Na

maior parte do período, a Sala A apresentou umidade relativa mais elevada, ficando com média de 81,1%, enquanto na Sala B o seu valor médio foi de 78,7%.

Como visto na figura 66, a umidade absoluta externa também apresentou grande oscilação, com a média de 12,5g/kg_{ar}. Mas os valores chegaram a variar de 7,9g/kg_{ar} para 18,3g/kg_{ar} em um único dia. A oscilação da umidade absoluta no interior das salas foi menos brusca e ocorreu de forma similar. A Sala A apresentou média de 15,1g/kg_{ar} e a Sala B, de 16,01g/kg_{ar}. A diferença média de 0,89g/kg_{ar} é similar à encontrada nos estudos previamente descritos.

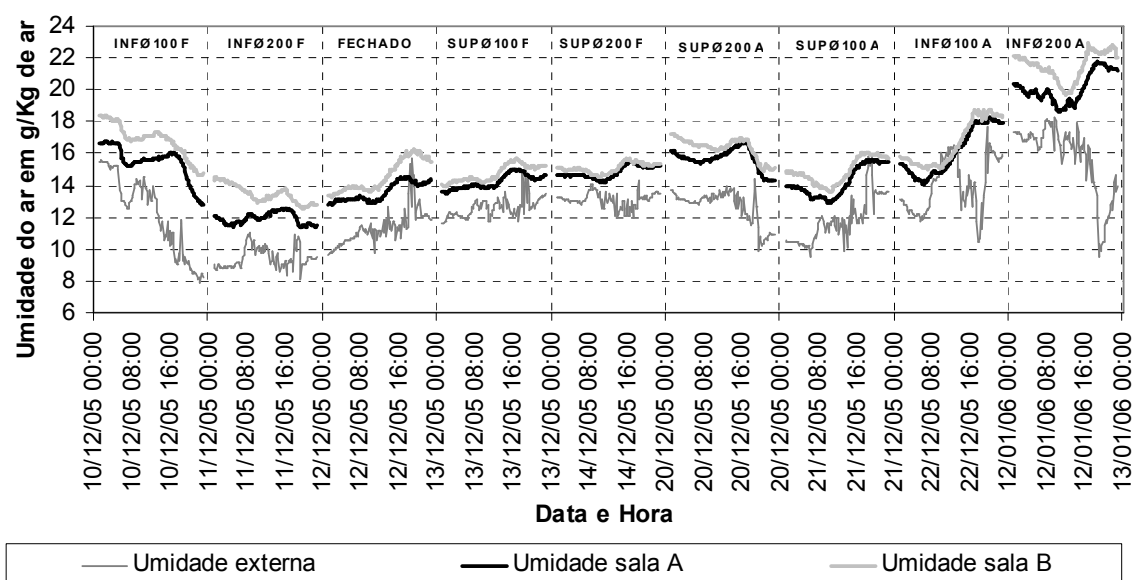


Figura 66: gráfico da umidade absoluta do ar externa e interna

Uma vez que estamos avaliando o comportamento higrotérmico da sala ventilada por tubos enterrados no verão e que a comparação dos ambientes foi executada na primavera, no dia 12 de dezembro, novamente se monitorou ambas as salas com a totalidade de esquadrias e sistemas de ventilação fechados com a intenção de validar os dados anteriormente adquiridos. Estes dados são apresentados no sub-capítulo 6.4 devido à sua maior relação com a sua temática.

6.3.2 Observação da Influência das Grandezas Físicas no Deslocamento de Ar no Interior dos Tubos enterrados

Como visto anteriormente na bibliografia, a totalidade dos trabalhos encontrados sobre o tema coloca a diferença de temperatura como o principal gerador do deslocamento de ar dentro dos tubos para o sistema de ventilação natural por dutos enterrados, ou utiliza o sistema de ventilação de maneira empírica. O estudo piloto, entretanto, demonstrou que essa relação não é tão clara e que existem outros fatores influentes.

Duas grandezas físicas foram aqui estudadas: a velocidade e direção do vento e a temperatura do ar. Estes fatores foram medidos em pontos determinados da edificação e arredores e foram subdivididos na análise gráfica.

Nos gráficos da figura 67, onde estão correlacionados os valores de velocidade do ar a 10 metros (esquerda) e a 0,5 metros (direita) com a velocidade do ar no interior dos tubos, é possível observar que existe uma grande dispersão de valores. Esta dispersão é mais intensa (coeficiente de correlação menor do que 0,1) para situações onde o vento externo a 10 metros é menor que 0,3m/s e o vento externo a 0,5 metros é menor que 0,1m/s.

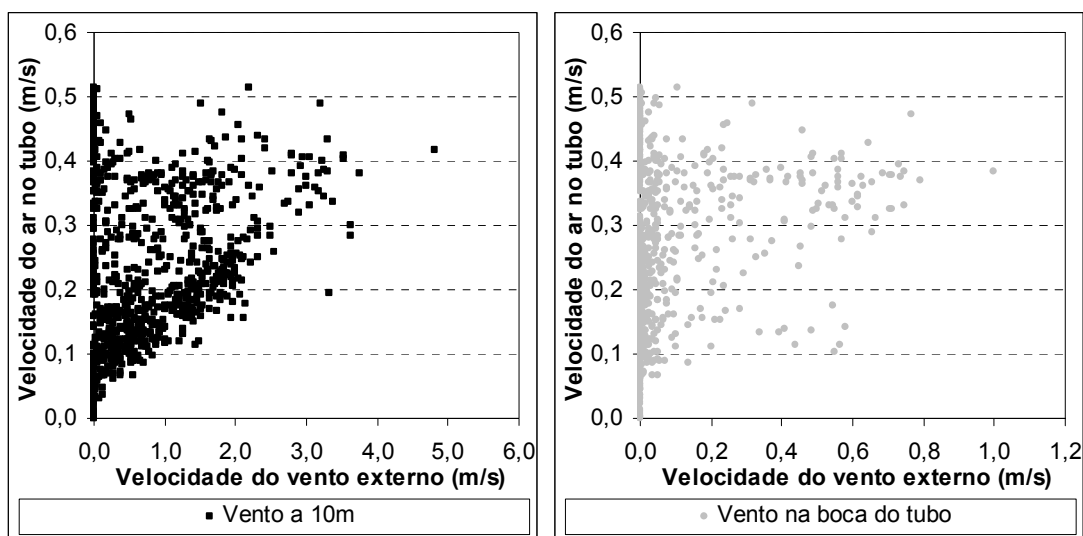


Figura 67: gráfico demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro dos tubos com a velocidade do vento externo a 10m (à esquerda) e a 0,5m de altura (à direita)

A causa dessa dispersão para valores baixos do vento externo é o início da atuação da diferença de temperatura para esses valores. Sendo assim, optou-se por analisar os dados da influência da velocidade do vento no deslocamento de ar dentro dos tubos excluindo estas zonas de grande dispersão e por fazer a análise da influência da diferença de temperatura apenas para essas situações excluídas.

No gráfico à direita na figura 68, observamos a atuação do vento externo, medido a 10 metros, sobre o deslocamento do ar dentro, separadamente, para os tubos inferiores e superiores. Observamos que existe uma tendência de crescimento da velocidade do ar dentro do tubo com o aumento da velocidade do vento externo para ambos os casos. Porém, é encontrada uma correlação bem mais forte no cruzamento dos dados para o caso dos tubos superiores do que para o dos tubos inferiores.

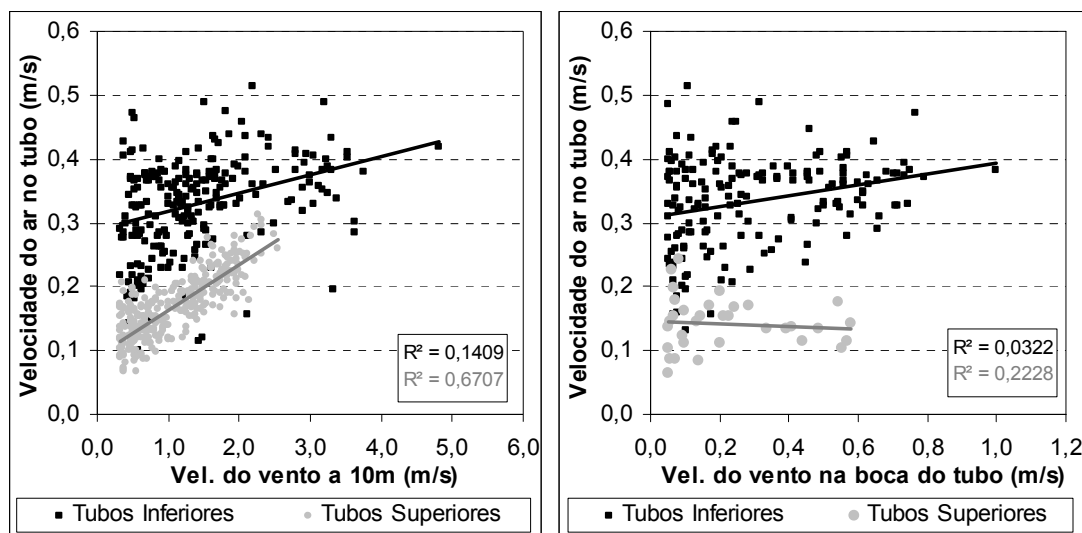


Figura 68: gráficos demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro dos tubos com a velocidade do vento a 10m (à esquerda) e a 0,5m de altura (à direita), excluindo períodos de calmaria

Dentre as possíveis causas à baixa correlação, podem ser citadas a execução de um estudo não caracterizado por ser um experimento puro (no qual as demais variáveis são fixas e controladas), pois as medições não ocorrerem em laboratório (onde é possível controlar melhor as interferências externas). Além das demais variáveis influentes monitoradas (caso da diferença de temperatura que não foi excluída), podemos citar a característica artesanal da edificação,

que apresenta esquadrias de madeira, tradicionalmente com alta permeabilidade ao ar através das frestas, como um dos principais motivos para o baixo coeficiente encontrado. Um baixo índice de correlação indica que a linha gerada não é suficiente para explicar a totalidade dos resultados, mas indica a tendência dessa correspondência devido ao tamanho da amostra.

Uma vez, porém, que os itens acima citados atuam sempre de maneira igual na edificação, dentre os fatores monitorados, aquele que acreditamos explicar melhor a alta dispersão dos valores atingidos pelos tubos inferiores é a maior exposição de suas bocas externas aos ventos dominantes. Como vimos na figura 68 à esquerda, os tubos superiores apresentam uma correlação muito mais significativa que a dos tubos inferiores.

Como visto anteriormente, a velocidade média do ar que incide sobre os tubos inferiores é 0,1m/s maior que a incidente nos tubos superiores. Essa baixa diferença na média ocorre devido à grande quantidade de registros nulos obtidos, porém, existem 129 registros de velocidades superiores a 0,1m/s incidentes na boca externa dos tubos inferiores, contra apenas 19 incidentes na dos tubos superiores (gráfico à direita da figura 68).

Diferentemente do vento medido a 10 metros, o vento junto à boca do tubo (gráfico à direita da figura 68) apresentou pequenas inclinações de reta e relação crescente para os tubos inferiores e decrescentes para os tubos superiores, em relação à velocidade atingida no interior dos tubos. Dessa forma, não fica claro se a velocidade do vento junto à boca do tubo aumenta ou diminui a velocidade do ar no interior dos tubos e o porquê dessa ocorrência diferenciada.

Como visto no gráfico à esquerda da figura 69, o efeito do vento externo na velocidade do ar dentro do tubo não se apresentou diferenciado com relação ao diâmetro dos tubos, uma vez que ambas as linhas apresentam-se com pouca diferença de inclinação. Constata-se, porém, que os tubos de 100mm apresentam uma maior extensão de resultados de obtidos (devido ao vento externo ser mais intenso nos dias em que foram monitorados) e um coeficiente de regressão mais elevado (embora também baixo para um experimento).

É importante colocar, aqui, que está se tratando de valores absolutos, medidos no centro do tubo, e não de valores médios de vazão em toda a sua seção. Caso aplicássemos este fator, as velocidades médias, no tubo de 100mm seriam inferiores e os ângulos de inclinação das retas seriam diferentes (o tubo de 200mm teria um ângulo mais acentuado), porém o grau de correlação permaneceria inalterado.

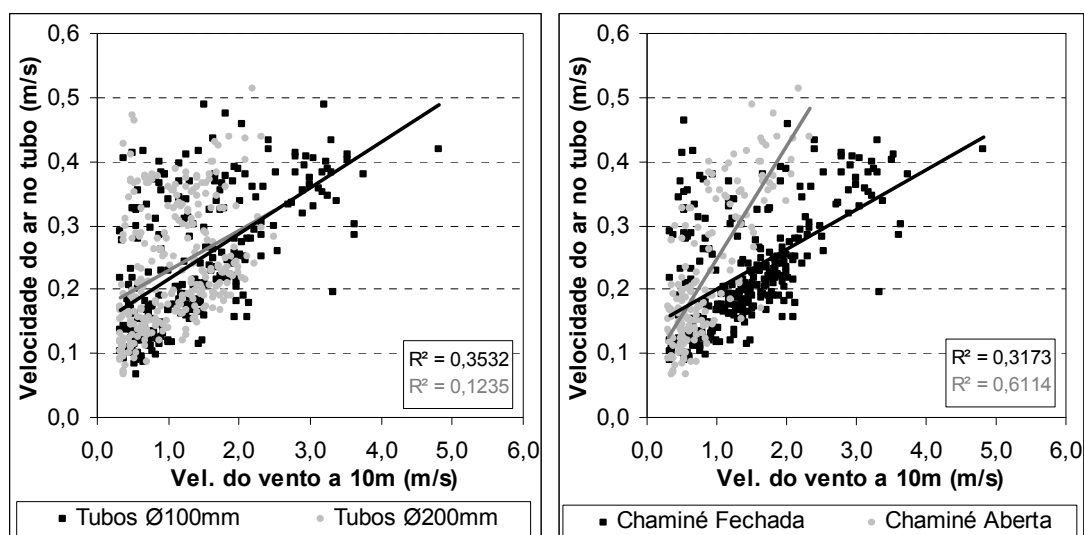


Figura 69: gráfico demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro do tubo com a velocidade do vento a 10m para diferentes diâmetros (à esquerda) e diferentes situações da chaminé (à direita), excluindo situações de calmaria

A abertura da chaminé (aqui funcionando como exaustor eólico) proporcionou uma melhora significativa na relação entre velocidade do vento e do ar dentro dos tubos como visto no gráfico à direita da figura 69. A linha de tendência apresentou um crescimento bem mais acentuado e a dispersão dos pontos diminuiu significativamente. Essa constatação demonstra a melhora provinda de uma área franca para a exaustão do ar.

A segunda variável estudada foi a diferença de temperatura do ar entre (a) dos extremos dos dutos, (b) do centro do ambiente interno e do externo e (c) da base e do topo da chaminé solar (gráfico à direita, ao centro e à esquerda, respectivamente da figura 70).

Embora esta grandeza física seja uma força atuante na totalidade do período estudado, como descrito anteriormente, foi constatado que sua influência na velocidade do ar, dentro do tubo, é melhor observável nas situações na qual o vento externo está em calmaria. Desta forma, os gráficos das figuras 71 e 72 apresentam a atuação da diferença de temperatura em situações nas quais a velocidade do ar externo a 10 metros é inferior a 0,3m/s e do vento externo a 0,5m é inferior a 0,1m/s.

Não foi possível executar um agrupamento de dados por diâmetro, por inclinação e por situação da chaminé no estudo da influência da temperatura no deslocamento de ar no interior dos

tubos (a exemplo do estudo da atuação dinâmica). Tal fato ocorre, porque os tubos enterrados, junto ao Protótipo Ventura, apresentam características distintas (apontadas na descrição do protótipo) e o efeito térmico no deslocamento do ar apresenta relações intrínsecas com a diferença de altura, com as resistências físicas ao fluxo de ar e com a profundidade (temperatura do solo), como apresentado na revisão bibliográfica (através da equação 2 e 3). Desta forma, os gráficos são apresentados independentemente para cada situação. Os valores de diferença de temperatura do ar não foram colocados em módulo (manteve-se o sinal negativo) justamente para demonstrar o turno em que foram registrados (sinais negativos indicam o turno noturno).

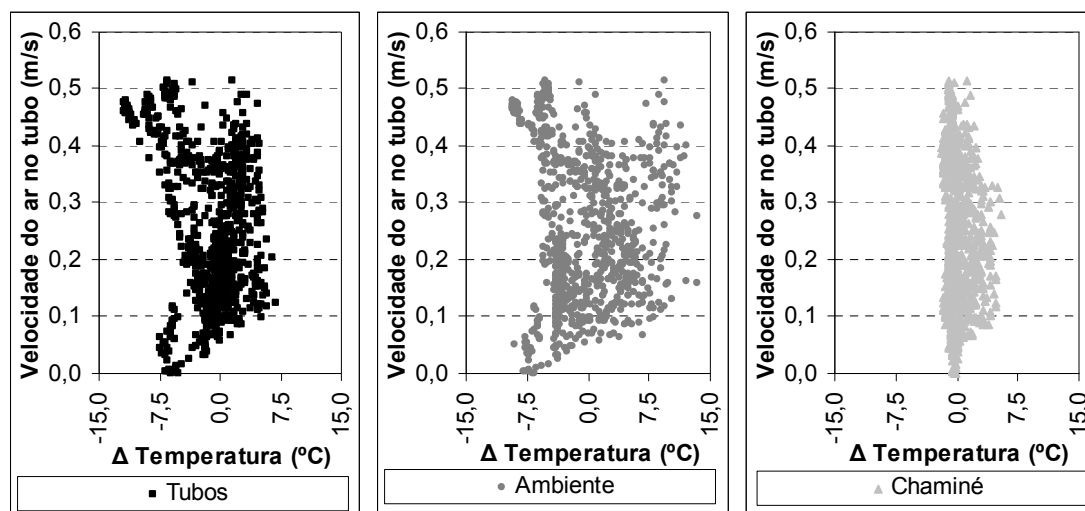


Figura 70: gráfico demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro do tubo e a diferenças de temperatura entre as extremidades inferior e superior dos tubos (à esquerda) do ambiente (ao centro) e da chaminé solar (à direita)

Podemos observar que existe a tendência de aumento da velocidade do ar dentro do tubo, à medida que aumenta a diferença de temperatura do ar no interior dos tubos e entre o interior do ambiente e o exterior. Esta relação, porém, é clara e com alto coeficiente de relevância apenas nos tubos inferiores. Os resultados adquiridos nos tubos superiores se apresentaram dispersos e, até certo ponto, incoerentes, fato que exigiria estudos mais aprofundados para serem avaliados, não possíveis neste trabalho.

A diferença de temperatura entre os ambientes externo e interno se manifesta levemente mais influente no deslocamento de ar nos tubos, que a ocorrida dentro do próprio tubo, pois valores

menores (em módulo) representam uma maior velocidade do ar. As possíveis justificativas são a menor resistência ao fluxo de ar, ao maior volume de ar envolvido e a maior diferença de altura entre os extremos inferiores e superiores da sala.

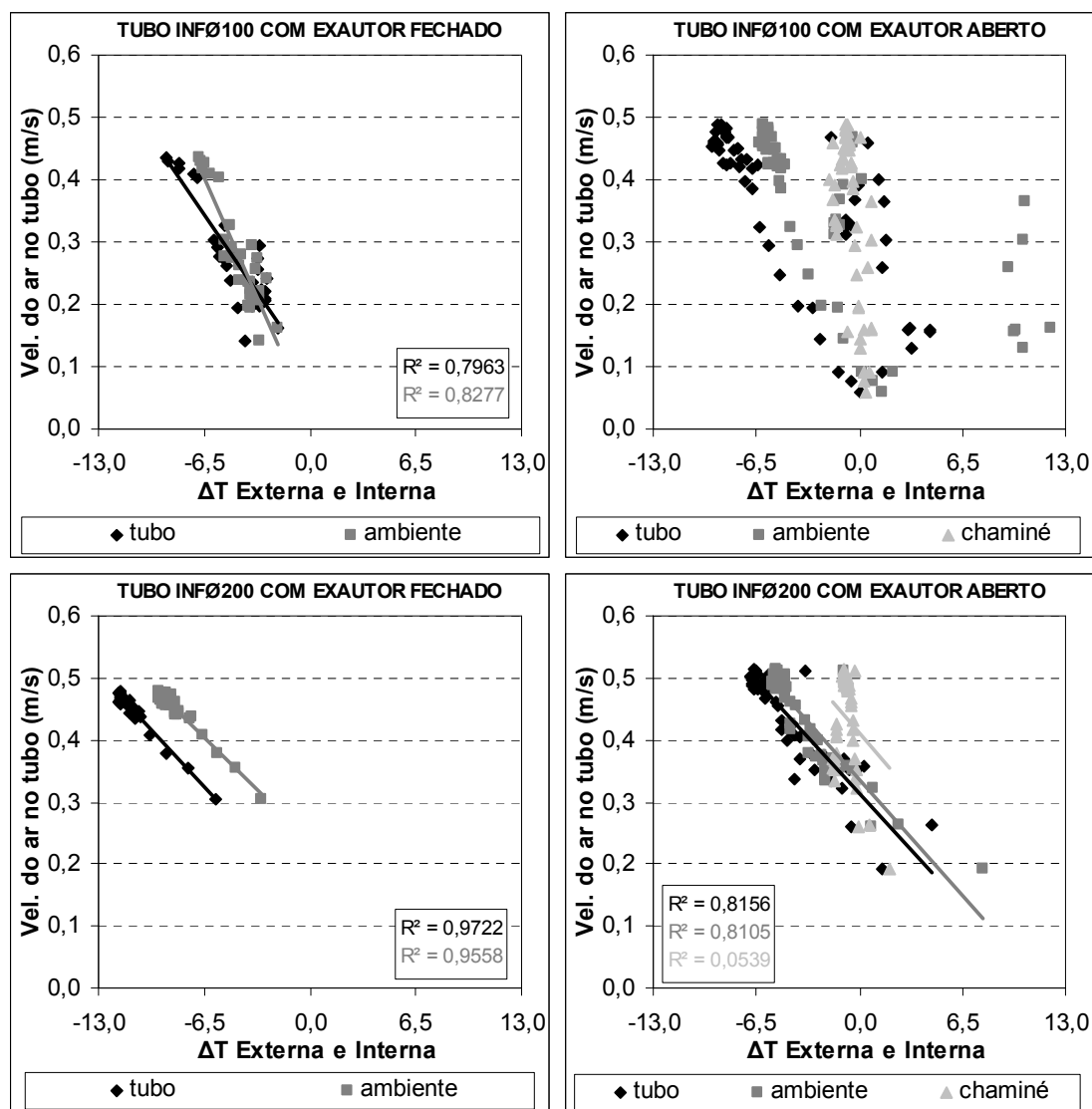


Figura 71: gráfico demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro dos tubos inferiores e a diferenças de temperatura para cada configuração do sistema

Os valores negativos de diferença de temperatura são característicos do período noturno, onde a temperatura externa é menor que a interna. Como observado nos gráficos, eles correspondem à maioria dos registros, pois como descrito anteriormente, ocorreram períodos de calma-

ria predominantemente à noite. Sendo assim, um estudo mais aprofundado sobre a influência da chaminé solar no deslocamento de ar no interior dos tubos, por diferença de temperatura ficou prejudicado. Mesmo nos poucos registros diurnos (positivos), porém, sua influência demonstrou-se baixa, possivelmente pela ação das frestas da edificação, que anularam seu potencial de deslocamento de ar nos tubos.

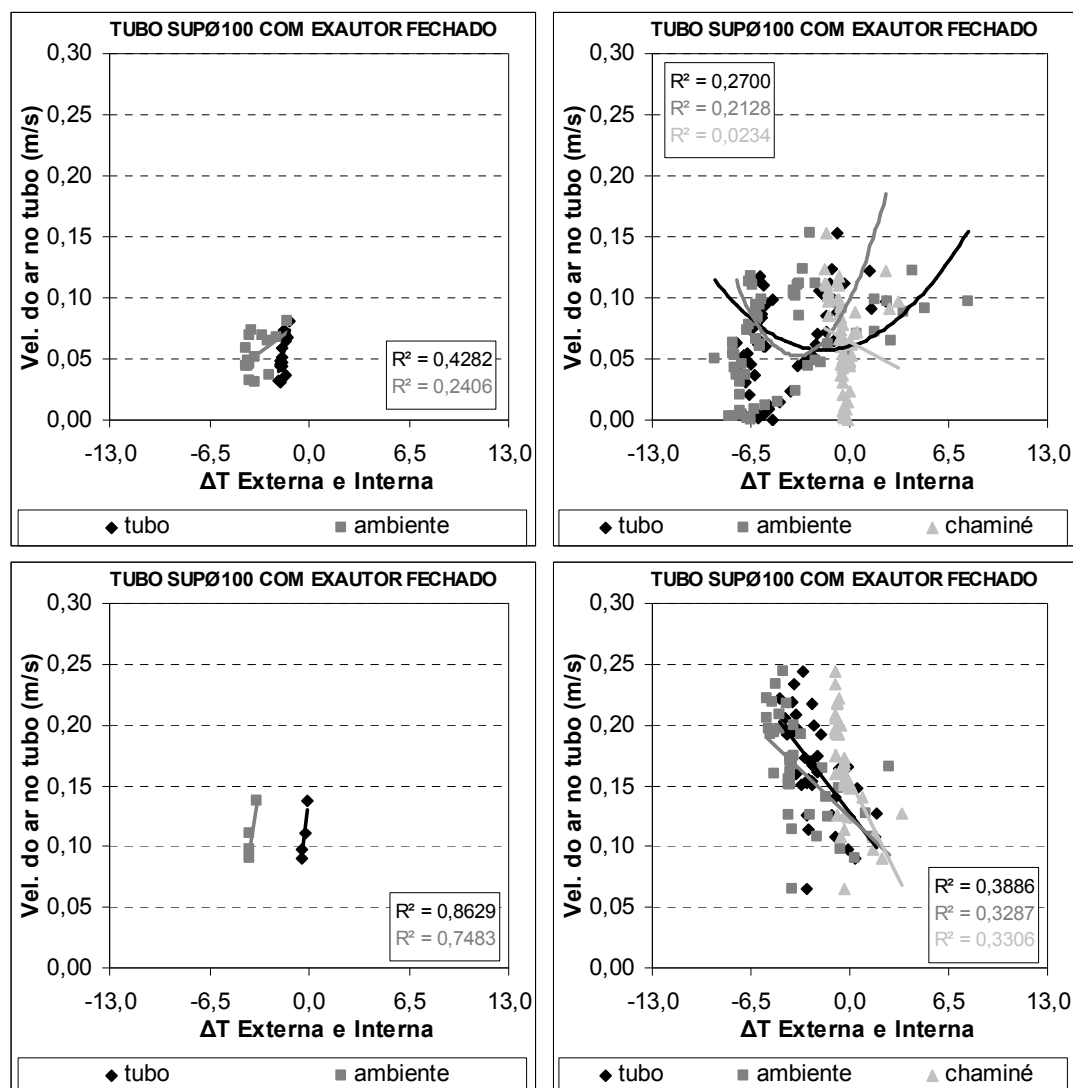


Figura 72: gráfico demonstrando a relação entre a velocidade do ar dentro dos tubos superiores e a diferenças de temperatura para cada configuração do sistema

O sentido do deslocamento do ar dentro do tubo segue um padrão tênue e pouco relacionado com as variáveis medidas. A indicação mais evidente é sua relação com a orientação dos tubos e a direção do vento. Nos gráficos da figura 73, os tubos são agrupados em superiores (orientação sul-sudeste) e inferiores (orientação norte) e cruzados os registros de direção do vento com o sentido do fluxo de ar.

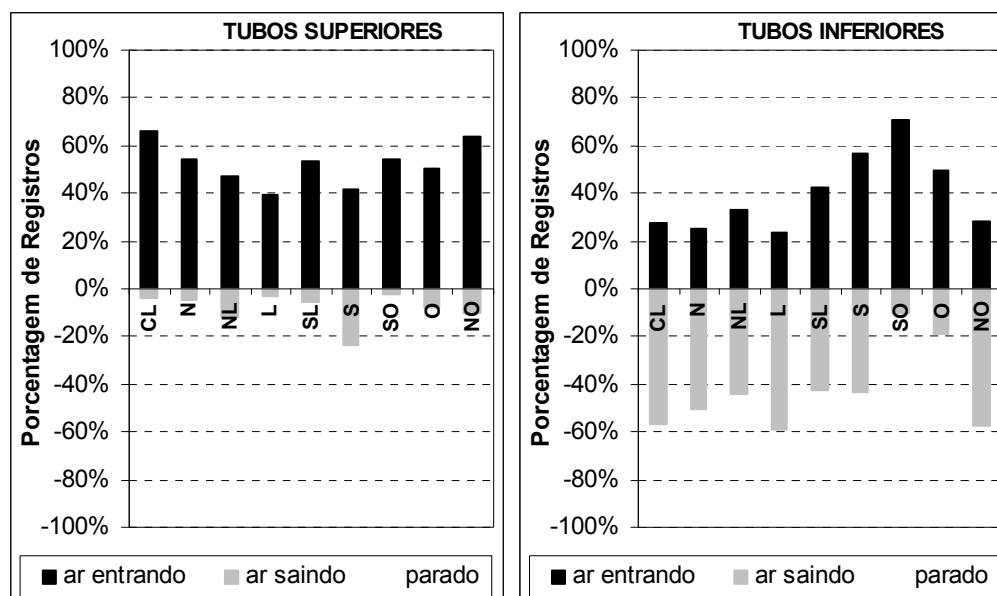


Figura 73: Gráfico do sentido do deslocamento de ar para cada conjunto de tubos (obs.: registros negativos indicam ar saindo da edificação pelos tubos)

Nos tubos superiores, em 64,3% dos registros, o ar estava se deslocando do exterior da edificação para o interior. Em 31,0% dos casos não foi registrada movimentação e em apenas 4,7% ocorreu fluxo reverso. De maneira geral, os momentos onde o ar está saindo da edificação estão divididos uniformemente nas direções do vento externo, com poucos registros a mais na orientação sul (situação na qual a extremidade externa do tubo está mais exposta).

Já nos tubos inferiores, em 31,2% dos registros, o ar estava se deslocando do exterior da edificação para o interior. Ocorreram apenas 16,2% de casos onde o ar não estava se deslocando e, na maioria das vezes, 52,6% dos casos, ocorreu fluxo para fora. Os registros de fluxo com sentido para o interior da edificação se concentraram em situações de vento oriundo dos qua-

drantes de sudeste, sul, sudoeste e oeste, representando as situações onde a boca deste tubo está mais protegida.

Este padrão de comportamento, encontrado tanto em tubos superiores quanto em inferiores, leva a crer que proteger as bocas externas dos tubos frente aos ventos predominantes no sistema monitorado colabore para a circulação de ar de fora para dentro da edificação através dos tubos. A possível explicação é o impedimento da criação de zonas de pressão negativa nas bocas externas dos tubos, as quais gerariam sucção. Esta colocação faz sentido quando pensamos a atuação do vento, causando este mesmo efeito de sucção, sobre a chaminé solar (ou exaustor eólico), uma vez que, como vimos, a velocidade do ar é acentuada com a abertura da chaminé.

Ela, porém, contrasta quanto ao referenciado na maior parte da bibliografia, sobre o comportamento do ar dentro de tubos de sistema linear, com diferença de altura e temperatura entre as extremidades. A bibliografia consultada aponta que, em situações onde o ar está com mais calor que o solo (dias de verão), o sentido do ar em um tubo inclinado seria descendente, ocorrendo o oposto (sentido ascendente) para situações onde o ar está com menos calor que o ar (noites ou inverno).

Em contraste com o indicado na bibliografia, observamos que este efeito é válido apenas para as horas de calmaria do vento externo registradas (que no caso do estudo foram poucas, pois o período diurno, no qual ocorreram os registros, apresentaram poucos momentos de calmaria). Contudo, embora o aumento da diferença de temperatura tenha uma correlação alta com a velocidade do ar, nos tubos inferiores (como visto anteriormente), isso não representou uma uniformidade de registros do sentido do fluxo.

Como vimos nesta etapa, existem 2 fatores monitorados influentes no deslocamento e sentido da velocidade do ar dentro dos tubos: a diferença de temperatura e o vento com sua velocidade e direção. Dentre eles, o dominante é o efeito dinâmico, ocorrendo o efeito térmico apenas nos momentos de calmaria do vento externo.

A correlação entre vento e velocidade do ar nos tubos é diretamente proporcional para os ventos medidos a 10m de altura. Esta correlação é maior para os tubos superiores do que para os tubos inferiores, possivelmente devido à proteção dos primeiros aos ventos dominantes. O vento medido junto à extremidade externa dos tubos, não apresenta uma relação clara (se dire-

ta ou inversamente proporcional à velocidade do ar nos tubos), porém, sua presença determina um acréscimo na velocidade do ar nos tubos.

Os diâmetros estudados não demonstraram influência significativa na relação entre velocidade do vento e a velocidade do ar dentro dos tubos para os limites monitorados. Já a chaminé solar melhorou significativamente esta relação, demonstrando a importância de uma abertura funcionando como exaustor de ar.

No efeito dinâmico, a diferença de temperatura dentro dos tubos e entre os ambientes (interno e externo) foram o que apresentou maior índice de correlação com a velocidade do ar nos tubos. Para este efeito, não foi possível um estudo mais aprofundado sobre a influência do diâmetro e da orientação, nem se identificou a atuação da chaminé solar na velocidade do ar.

Ambos os efeitos atuam no sentido de deslocamento de ar dentro dos tubos. Para esse, o efeito dinâmico também é dominante e está relacionado principalmente com o grau de exposição das bocas externas ao vento. O efeito térmico ocorre nos períodos de calmaria do vento e atua conforme apontado pela bibliografia (o ar dentro dos tubos ascende quando o solo está mais aquecido que o ar e descende na situação oposta).

6.4 OBSERVAÇÃO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO

O estudo que segue tem por objetivo observar o desempenho higrotérmico do ar da sala com o sistema funcionando por completo em um período de tempo maior que os estudos anteriores. Como o estudo anterior, em um primeiro momento, são expostos os valores registrados de maneira cronológica, para em seguida, os dados serem arranjados sob gráficos mais elucidativos, para se observar os resultados e se executar comparações.

Além de apresentar os dados coletados no interior e no exterior do Protótipo Ventura, se discute aqui os resultados obtidos no período observando os limites e critérios de conforto térmico para edificações em países em desenvolvimento e clima quente sugeridos por Givoni (1992), o número de graus de desconforto proposto por Barbosa (1997), o grau-hora e o retardo térmico.

No período de verão, o comportamento das salas foi novamente comparado. Embora aqui descritos, as figuras demonstrando estes gráficos são expostas no sub-capítulo 6.3 (figura 65 e 66) devido ao respeito à ordem cronológica utilizada no trabalho. A curva interna de temperatura mostrou-se, novamente, idêntica, atingindo uma correlação de Pearson de 0,992 no Teste-T pareado. Observamos que, com a entrada do verão, a diferença entre as temperaturas médias subiu de 1,0°C para 1,6°C. O mesmo ocorreu com a diferença entre as umidades absolutas médias que subiu de 0,3 g/kg_{ar} para 1,0g/kg_{ar}.

Um fator que influenciou nessas diferenças elevadas registradas foi a existência de dias com a sala sendo ventilada pelos tubos precedentes ao monitorado com a sala totalmente fechada. Como vimos na descrição do protótipo, as paredes da edificação (de pedra tipo grês) apresentam elevada inércia térmica e alto poder de retenção de umidade. É bem provável que durante o período em que foi ventilada a sala tenha alterado sua quantidade de umidade e de calor armazenados nessas paredes, sendo necessários períodos maiores para que ocorra novamente a estabilização.

Desta forma, por ter ocorrido em apenas um dia e por terem os valores apresentado diferenças significativas, os resultados dessa conferência não foram considerados nesta etapa, mas servem de indicativo que estudos mais aprofundados devem ser executados para confirmar as conclusões de desempenho higrotérmico apresentados.

O desempenho térmico foi monitorado em dias ininterruptos no período entre as zero hora do dia 14 de janeiro de 2006 e às 19h30min do dia 03 de fevereiro de 2006. Foram efetuados 994 registros a cada meia hora, de um total de 1008 possíveis. Como visto na figura 74, o período monitorado foi caracterizado por radiação solar variável, com alguns dias ensolarados e outros nublados. A quantidade média horária de radiação solar diária no período foi de 329,5Wh/m².

Como visto na figura 75, o vento externo manteve seu comportamento cíclico ao longo dos dias. Sua velocidade média foi de 0,3m/s, com rajada máxima de 3,9m/s às 17h30min do dia 16 de janeiro de 2006. Assim como no estudo anterior, a velocidade do vento externo, a 0,5m do solo, junto à boca externa, se mostrou diferenciada para os tubos superiores e inferiores e não proporcional aos valores registrados a 10 metros de altura. Neste estudo, não foram registrados os valores de sentido do ar dentro do tubos. Supõe-se, porém, que a proporção de valores seja mantida.

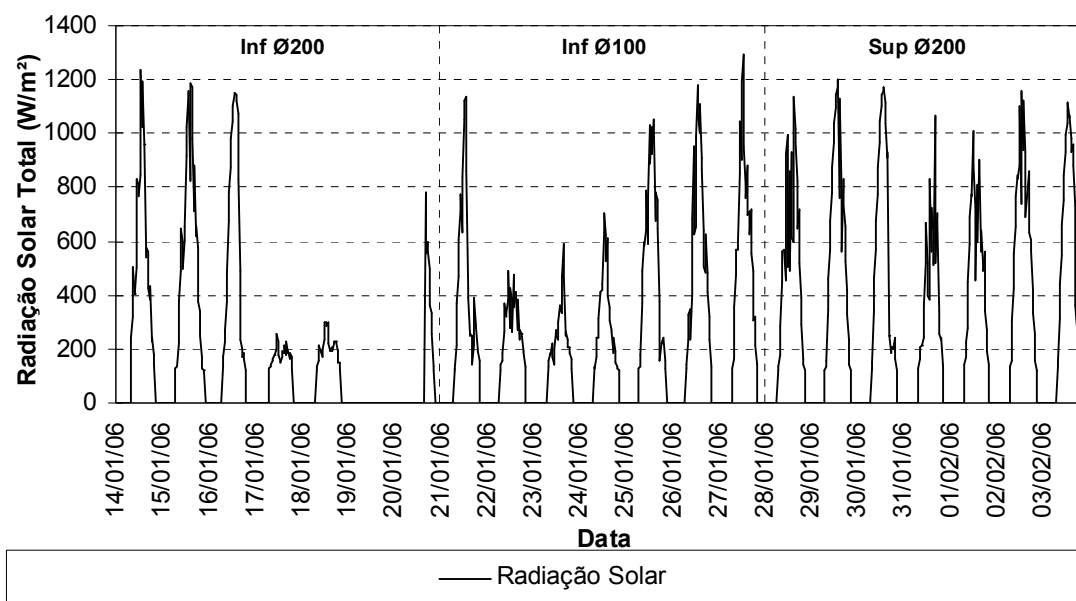


Figura 74: gráfico da radiação solar total (global)

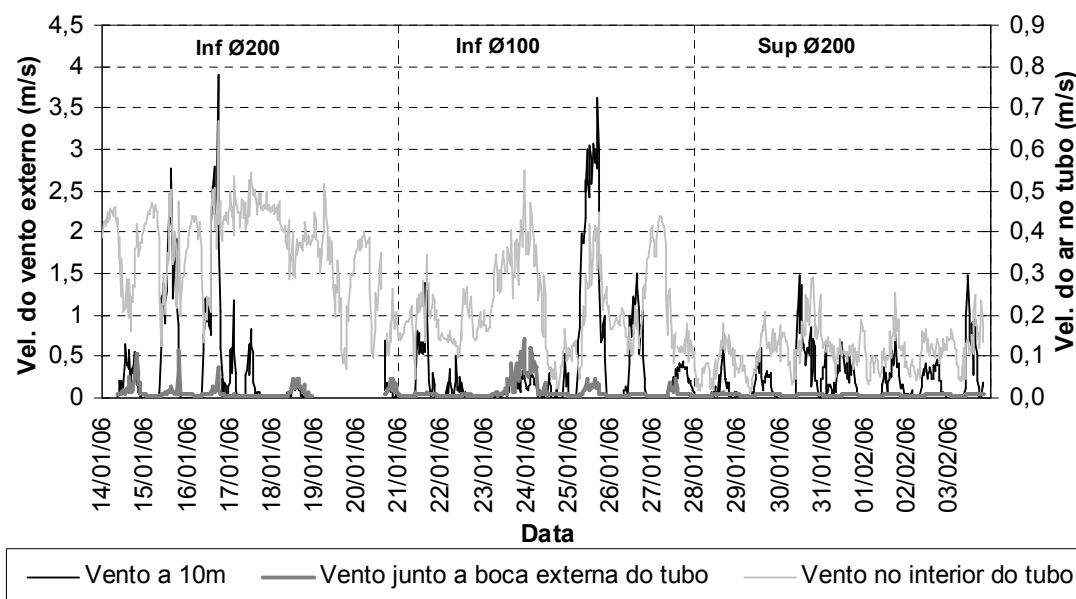


Figura 75: gráfico da velocidade do ar no interior dos tubos, velocidade do vento a 10 metros e a 0,5 metros de altura

A velocidade do ar interno da edificação, entretanto, apresentou registros entre 0,25m/s e 0,5m/s. Estas velocidades são apontadas por Evans e Schiller (1994) como refrescantes para

as temperaturas internas registradas, reduzindo a sensação térmica entre $0,7^{\circ}\text{C}$ e $1,2^{\circ}\text{C}$. Mesmo as velocidades máximas não gerariam desconforto, pois não ultrapassaram $0,7\text{m/s}$, ficando aquém da velocidade do limite máximo de $1,5\text{m/s}$ sugerido pelos mesmos autores para o interior da edificação durante o dia.

Observamos, na figura 76, que os primeiros dias de medição representam aqueles nos quais as temperaturas do ar externo estiveram mais elevadas. No dia 16, de janeiro verificaram-se os maiores registros de temperatura do ar externo, com o valor de $39,4^{\circ}\text{C}$, às 15h 30min. No mesmo dia, a Sala A registrou a temperatura de $31,1^{\circ}\text{C}$ às 16 horas. Já na Sala B, o pico ocorreu um dia antes, às 19 horas do dia 15 de janeiro.

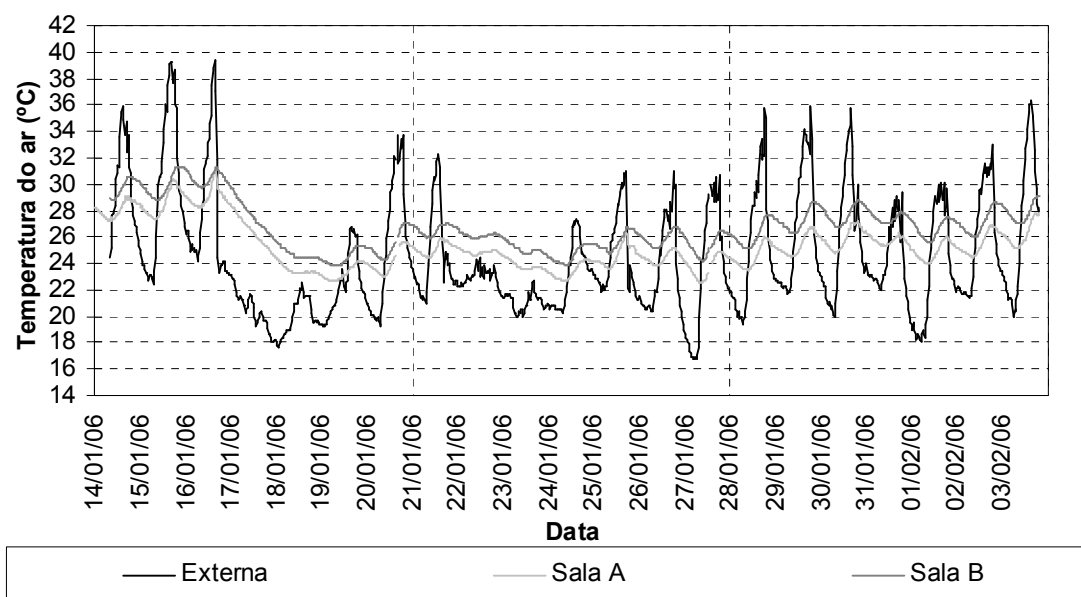


Figura 76: gráfico da temperatura do ar interno e externo

Três dias após o início do estudo, na noite do dia 16 de janeiro, ocorreu uma entrada de frente fria, na qual as temperaturas externa e interna decresceram rapidamente. O menor valor externo de temperatura foi registrado às 4h 30min do dia 27 de janeiro, com registro de $16,7^{\circ}\text{C}$. A menor temperatura do ar no interior da Sala A ocorreu no mesmo dia, às 8 horas da manhã, quando o termômetro de bulbo seco registrou $22,6^{\circ}\text{C}$. Na Sala B, ocorreu às 5h do dia 19 de janeiro, na qual foi registrada a temperatura de $23,8^{\circ}\text{C}$.

A temperatura média do ar externo foi de 24,5°C, na Sala A foi de 25,4°C e na Sala B foi de 26,7°C. A diferença de 1,28°C entre as médias registradas no período, não representa perdas ou ganhos significativos se comparada aos resultados obtidos durante a comparação dos ambientes (a diferença registrada, para dias de sol, foi de 1,0°C).

Comparando os gráficos 74 e 76, vemos que, nos dias de sol, ocorre grande amplitude térmica do ar externo, diferente dos dias nublados, que apresentaram baixas variações.

Percebe-se também que o número de horas de desconforto por calor, no ambiente externo, é maior do que o ocorrido no interior da sala. Sob esse aspecto, observa-se que a edificação conseguiu amortecer os efeitos das amplitudes externas, já que a maior parte da curva com a oscilação dos valores internos permaneceu dentro da faixa de conforto (entre 20°C e 29°C). No dia 15 de janeiro, ocorreu o registro das maiores amplitudes da temperatura do ar externo: 17,0°C de variação. No mesmo dia, porém, a Sala A variou apenas 3,05°C e a Sala B 2,5°C.

O retardo térmico médio durante todo o período, na Sala A, foi de 2 horas, enquanto, na Sala B, foi de 4 horas. Essa diminuição do tempo de retardo térmico da Sala A em relação à Sala B, e em relação ao verificado nos estudos anteriores, era esperada, uma vez que estamos ventilando a sala com ar externo.

Essa característica da edificação, de apresentar boa inércia térmica e um bom retardo térmico, se demonstrou recomendável para edificações que utilizam ventilação por dutos, pois no momento crítico de temperatura do ar interior (como, por exemplo, às 17 horas, que representa o horário na qual é registrada as maiores temperaturas interna na Sala A) está sendo captado do exterior um ar com temperaturas mais amenas, já com o início do entardecer.

Tabela 13: diferença de temperatura do ar nas extremidades dos tubos interna e externa em graus Celsius

	Temp. interna < Temp. externa				Temp. interna > Temp. externa			
	INFØ100	INF Ø200	SUPØ100	SUPØ200	INFØ100	INF Ø200	SUPØ100	SUPØ200
Mínima	-0,90	-0,20	-5,00	-4,20	-9,80	-7,30	-11,00	-9,50
Média	4,08	4,09	1,52	0,69	-2,27	-1,95	-3,19	-2,56
Máxima	9,30	8,20	5,10	5,10	2,50	1,90	1,30	1,10

Para efeitos comparativos entre a temperatura do ar interior e exterior, porém, este retardo pode trazer má interpretação dos resultados de variação de temperatura, pois não pode ser

avaliado apenas entre períodos diurnos e noturnos. Desta forma, a tabela 13 foi elaborada buscando a variação de temperatura nos tubos, nos momentos onde a temperatura interna é menor e maior que a externa, respectivamente.

A análise da tabela permite concluir que os tubos atuam como amortecedores da temperatura interna. Nos momentos onde a temperatura da sala é menor que a externa, o ar é aquecido no interior dos dutos, enquanto é resfriado na situação oposta. É possível concluir então que, de maneira geral, o solo refrigera o ar nos dutos durante o dia e o aquece durante a noite. Uma observação mais detalhada permite dizer que os tubos inferiores permitem um maior aquecimento da sala, ao passo que os superiores, uma maior refrigeração. Esta conclusão é observável também na figura 77 na qual está representada a média de temperatura de cada semana. Vemos que os tubos superiores mantêm uma temperatura do ar, em média, inferior à da sala, ao passo que os tubos inferiores, uma temperatura superior.

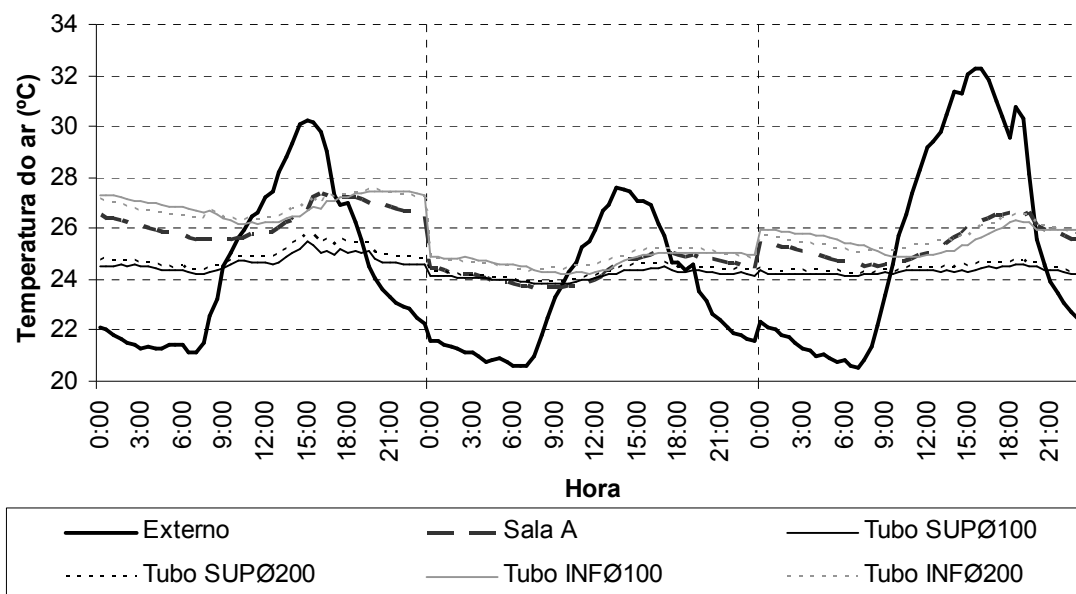


Figura 77: gráfico de temperatura do ar externo e interno médio a cada semana

A mesma figura mostra ainda que, em média, a temperatura do ar na saída do tubo apresenta uma amplitude térmica menor que a da sala. Esse efeito pode ser explicado pelo fato do solo apresentar uma massa térmica muito maior à edificação e demonstra que a troca de calor do ar

com o solo é efetiva. Conforme observado pela bibliografia e pelas medições, temperaturas médias menores podem ser obtidas através de tubos enterrados a maiores profundidades.

Como não houve nenhum registro de temperatura inferior a 20°C no interior do protótipo, optou-se por executar o estudo de graus-hora, para o verão, apenas para os de refrigeração. A seguir, na tabela 14, podem ser visualizados os valores de grau-hora para refrigeração e o número de horas com temperatura superior às bases determinadas.

Tabela 14: somatório de graus-hora para refrigeração

Temperatura base (°C)	Temperatura externa		Temperatura Sala A		Temperatura Sala B	
	Graus-hora	Nº. de horas	Graus-hora	Nº. de horas	Graus-hora	Nº. de horas
25	421,6	172,5	217,7	237	454,72	401,5
26	340,4	153,5	127,03	129,5	280,25	296,5
27	269,8	130	74,585	88,5	159,5	175
28	210,6	110	39,31	53,5	91,7	104,5
29	161,8	88	21,38	20	50,2	59,5
30	122,9	70	16,32	6	26,225	34

Durante as três semanas, no exterior, ocorreram 70 valores horários acima da temperatura-base de 29°C, os quais produziram um somatório de 122,9 graus-hora para refrigeração. Já no interior da Sala A, foram registradas apenas 6 horas acima da mesma temperatura base e 16,32 graus-hora. A Sala B mostrou-se mais aquecida, com 34 horas registradas e 26,2 graus-hora de refrigeração. É importante destacar que, com a ocupação da sala por pessoas e equipamentos, ocorrerá produção de calor e incremento de temperatura, possivelmente aumentando o número de horas que extrapola esses valores.

Para facilitar a compreensão da distribuição da temperatura do ar no verão, é apresentado um histograma contendo a temperatura do ar do ambiente externo e dos ambientes internos (figura 78). Também é possível observar os valores que aparecem com maior frequência nas medições. As colunas marcadas, dentro da linha tracejada representam o intervalo das horas consideradas dentro da zona de conforto (entre 20°C e 29°C para o verão).

Como observado, no exterior, os valores de temperatura apresentam-se melhor distribuídos e com a maioria dos valores entre 20°C e 24°C. No interior da Sala A, ocorre uma predominância significativa de valores na faixa entre os 23°C e os 26°C (229,5 horas), enquanto, na Sala B, na faixa de 24°C a 27°C (291 horas). Esta diferença, de aproximadamente 1°C, é idêntica à

obtida no estudo de comparação dos ambientes e demonstra que não há ganhos ou perdas significativos da Sala A com a abertura dos tubos.

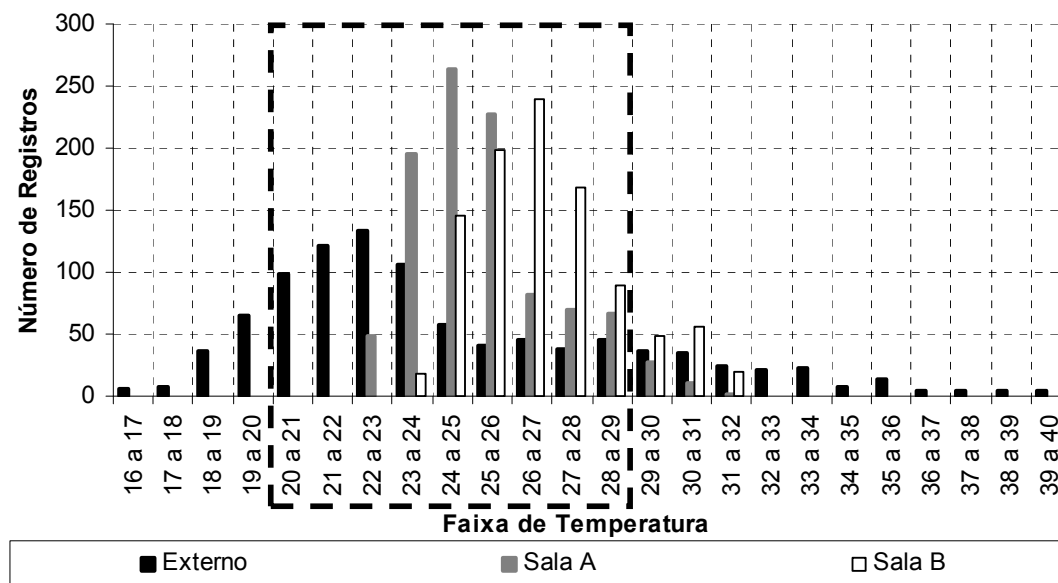


Figura 78: histograma de temperatura do ar externo e interno na sala A e na Sala B

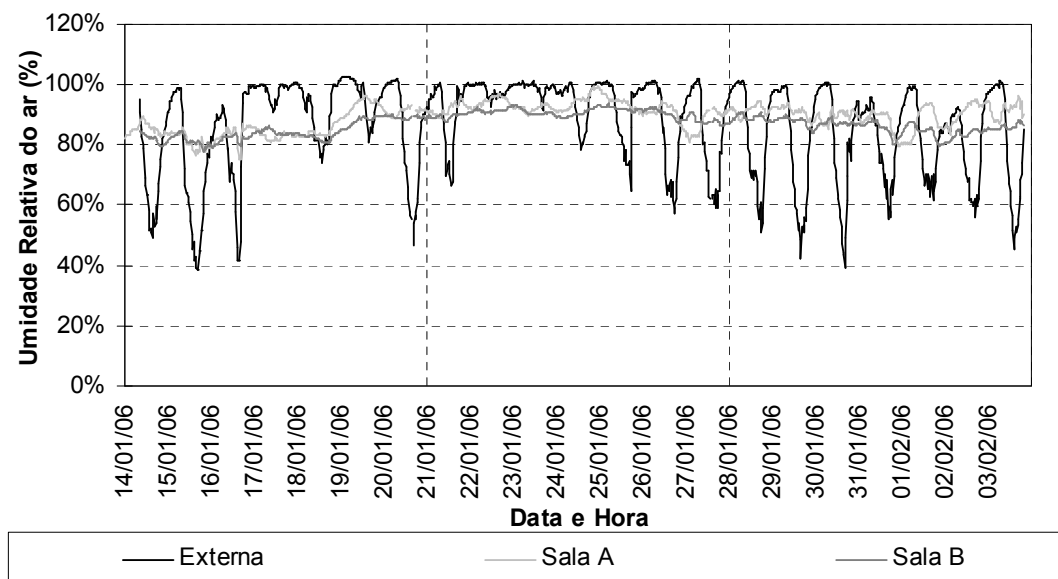


Figura 79: gráfico da umidade relativa do ar externa e interna na sala A e na Sala B

No histograma, destaca-se o amortecimento das temperaturas externas, principalmente aquelas superiores a 29°C, que somam 179 registros e foram reduzidos para 40 na Sala A e 125 na Sala B. Novamente salienta-se que, em uma situação real de uso, porém, é possível que muitos valores internos superem o limite de 29°C, no qual se deve ponderar inclusive sobre uma maior ventilação, através das esquadrias (nos momentos em que a temperatura do ar externo seja menor que a do interior).

Com relação à umidade relativa do ar, a figura 79 mostra a oscilação no exterior e no interior das salas do protótipo. Nota-se a grande variação de valores externos, com mínima de 38,3% e freqüentemente atingindo valores de 100% (mesmo com poucos dias de precipitação). No interior das salas, a predominância está entre 85% e 95%. A média externa foi de 86,4% e a interna, da Sala A, de 89,3% e da Sala B, de 87,0%.

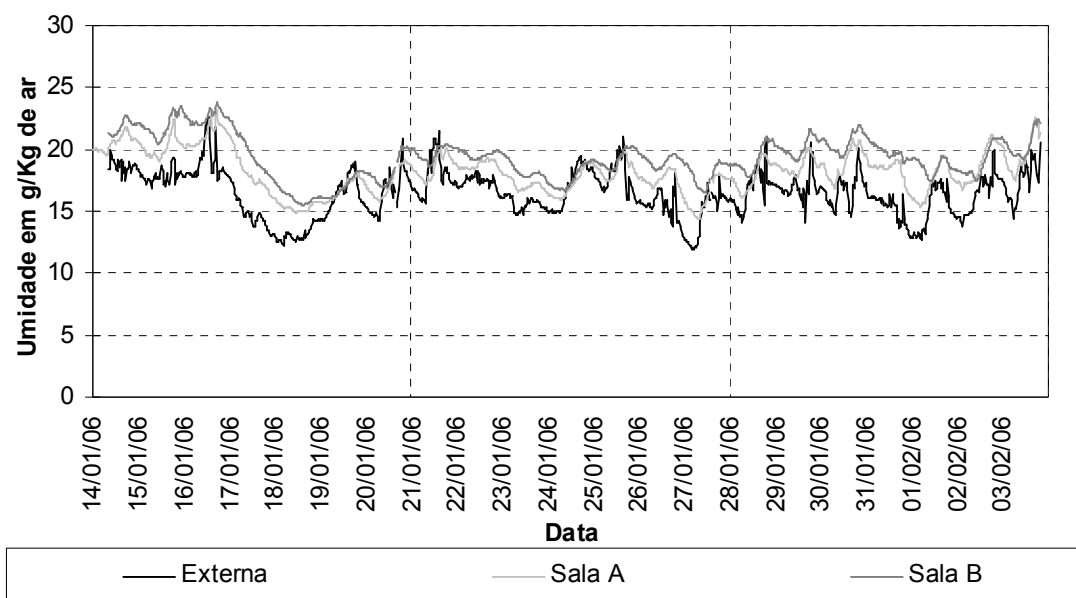


Figura 80: gráfico da umidade absoluta do ar externa e interna na sala A e na Sala B

Dos 708 registros (a cada meia hora) de umidade relativa, em 70,2% dos momentos, eles estavam em zona de desconforto. No interior das salas, esse número cresce. Na Sala A ocorreram 963 registros (ou 95,5%) e, na Sala B, 955 registros (ou 94,7%). Conforme colocado anteriormente, esta elevada umidade relativa, constatada mesmo no dia de maior calor, pode ser atribuída ao contato contínuo das paredes da edificação com o solo. A umidade elevada au-

menta consideravelmente a sensação térmica e, combinado à alta temperatura e à carência de ventilação, é a principal causa de desconforto térmico.

A figura 80 demonstra que as salas são mais úmida que o ambiente exterior também em relação à umidade absoluta. A média calculada para o exterior foi de $16,5\text{g/kg}_{\text{ar}}$, enquanto na Sala A foi de $18,2\text{g/kg}_{\text{ar}}$ e na Sala B foi de $19,3\text{g/kg}_{\text{ar}}$. Observamos que ocorreu a diminuição da umidade absoluta medida na relação da Sala A, em relação à Sala B, sendo que a diferença passou de $0,3\text{g/kg}_{\text{ar}}$, no estudo de comparação dos ambientes, para $1,1\text{g/kg}_{\text{ar}}$, com a atuação do sistema estudado.

Pudemos observar com este estudo que, embora as temperaturas do ar externo tenham atingido valores elevados, o ar interno (de ambas as salas) apresentou temperaturas dentro da faixa de conforto sugerida por Givoni (1992), na maioria das horas do período (entre 20°C e 29°C). A diferença média de 1°C registrada durante o estudo de comparação dos ambientes, manteve-se, demonstrando que a ventilação através de tubos enterrados, embora não melhore termicamente o ambiente, também não piora essa condição. Esta constatação é válida, pois como descrito anteriormente, a edificação já apresentava um bom condicionamento térmico devido sua arquitetura bioclimática.

O retardo térmico da Sala A reduziu para 2 horas, em comparação às 5 horas do estudo anterior e às 4 horas da Sala B. Este efeito era esperado, pois estamos ventilando a sala com ar externo. Contudo, a circulação do ar externo pelos tubos amenizou-o antes de seu ingresso na edificação, refrigerando o ar nos períodos de calor e o aquecendo nos períodos de frio.

Ocorreu uma redução da umidade absoluta da Sala A (ventilada) em relação à Sala B, ao compararmos os valores de ambos ambientes fechados. Da mesma forma, a velocidade do vento junto à extremidade interna dos tubos não apresentou valores elevados. A redução da umidade e a renovação do ar interior com controle, sem prejudicar a qualidade térmica do ambiente, podem ser apontadas como as principais vantagens do sistema de ventilação natural por tubos enterrados ao desempenho higrotérmico da edificação.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No capítulo anterior foi descrito o comportamento da edificação frente às condições climáticas do período estudado, bem como as grandezas físicas influentes no deslocamento de ar dentro dos tubos. Neste capítulo, primeiramente é feita uma avaliação sobre o método empregado, para então ser apresentada as principais conclusões sobre o experimento realizado, as recomendações de melhoria do sistema e, por fim, as sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

7.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO ADOTADO

O método e os critérios para avaliação das variáveis influentes no deslocamento de ar dentro dos tubos mostraram-se válidos, pois permitiram avaliar as faixas de atuação das grandezas físicas estudadas, para o sistema instalado no Protótipo Ventura.

Uma vez que a estratégia do método é um quase-experimento (e não um experimento puro), ocorreu uma série de interferências nos resultados, que se traduzem em baixos índices de correlação (R^2). As principais causas dessa dispersão podem ser atribuídas (a) à atuação conjunta dos fenômenos, uma vez que os mesmos não foram medidos isoladamente; (b) à existência de outros fatores não monitorados; (c) à inconstância dos fatores climáticos que são tomados em média de um período (diferentemente de um laboratório no qual se mantém esses fatores constantes); e (d) às características da edificação, principalmente das esquadrias, que apresentam infiltração de ar;

Da mesma forma, estes resultados obtidos não podem ser generalizados para a totalidade dos casos onde se empregue a ventilação natural por tubos enterrados, uma vez que este sistema é fortemente ligado a variáveis climáticas e às características do solo e da edificação.

Embora com grande dispersão, os valores adquiridos demonstram a tendência das variáveis influentes no deslocamento do ar nos dutos e servem de base para trabalhos e construções futuros que utilizem o sistema. Possivelmente, um estudo em laboratório ou em uma edifica-

ção estanque obtenha resultados diferentes, porém não representaria a realidade das edificações construídas na região.

Com relação ao método para a avaliação do desempenho higrotérmico do protótipo, o critério de graus-hora é de simples aplicação e constitui um recurso representativo do abrandamento das condições externas proporcionadas pela edificação. Já os limites de conforto propostos por Givoni (1992), para países em desenvolvimento, demonstraram-se úteis e representativos para demonstrar as faixas de conforto de temperatura e umidade do ar no interior das salas e no exterior.

7.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O COMPORTAMENTO DO SISTEMA

Os resultados apontam uma série de constatações sobre o real comportamento do sistema estudado, e alguns deles destoam do registrado na bibliografia e mesmo das hipóteses formadas para este trabalho. Este contraste não descarta os resultados anteriormente encontrados, apenas serve de complemento aos mesmos, pois o presente estudo procurou compreender o sistema de uma forma mais abrangente – e, na medida do possível, apresentar conclusões mais precisas e aprofundadas.

7.2.1 Fatores Influentes na Circulação de Ar dentro dos Tubos

O primeiro dos objetivos deste trabalho foi o de detectar as grandezas físicas que contribuem para a circulação de ar dentro dos tubos do sistema instalado no Protótipo Ventura, estimando suas faixas de influência e identificando a mais significativa no sentido do deslocamento. Além disso, procurou-se observar as modificações da velocidade de ar nos tubos geradas pelas 2 inclinações e pelos 2 diâmetros instalados, bem como pela abertura da chaminé solar.

Com o estudo, constatou-se que duas grandezas físicas são influentes no deslocamento de ar dentro dos tubos: o efeito dinâmico gerado pelo vento e o efeito térmico gerado pelas diferenças de temperatura. O efeito dinâmico, embora pouco referenciado pela bibliografia como influente em sistemas de ventilação por tubos enterrados, demonstrou-se dominante no sistema instalado, sendo ele, quando atuante, o principal responsável pelo deslocamento de ar no

interior dos tubos. Esta conclusão é observada a partir da forte tendência de crescimento da velocidade do ar no interior dos tubos com o aumento da velocidade do vento externo, independente de outros fatores.

Esta constatação difere da hipótese formada durante o projeto e construção do protótipo, de que o aquecimento do ar gerado na chaminé solar seria o fator mais influente no deslocamento de ar no interior do tubo.

Das duas alturas monitoradas, observamos que o vento a 10m apresenta-se atuante no deslocamento de ar dentro dos tubos para velocidade acima de 0,3m/s enquanto o atuante junto à boca do tubo apresenta influencia similar para velocidades acima de 0,1m/s. É bem provável que o vento junto ao solo mostre-se influente desde menores valores de velocidade, pois as medições foram tomadas junto à extremidade externa dos tubos.

Estes limites são baseados nos gráficos relacionando a velocidade do vento com a velocidade do ar nos tubos, que demonstram que para os valores de velocidade do vento abaixo dos valores acima citados, o coeficiente de correlação (R^2) é baixíssimo (menor do que 0,1). O efeito térmico, embora atuante na totalidade dos períodos, apenas nessas situações pode ser observado, ou, em outras palavras, passa a ser dominante na vazão do ar no interior dos tubos.

A observação desse limitado conjunto de registros de calma do ar, porém, demonstrou que as diferenças de temperatura do ar entre as extremidades (interna e externa) dos tubos e entre o interior e o exterior da edificação são os mais influentes na circulação de ar. Esta afirmativa é válida, pois as diferenças de densidade do ar geraram vazões de ar dentro dos tubos com valores de mesma magnitude do gerado pelo efeito dinâmico do vento (de até 0,6m/s, com coeficiente de correlação de até 0,97).

Já o sentido do deslocamento do ar no interior dos tubos não apresentou um padrão claro relacionado com as diferenças de temperatura estudadas ou com as velocidades do vento nas alturas monitoradas. Diferente do esperado – no qual as diferenças de temperatura entre o ar no interior dos tubos e o solo seriam determinantes no sentido do fluxo de ar – a variável que melhor explica o sentido do deslocamento é a orientação do tubo, ou, em outras palavras, é a proteção da extremidade externa do tubo à atuação dos ventos dominantes. A maioria dos registros, no qual o fluxo de ar nos tubos foi do exterior para o interior da edificação, ocorreu nas situações nas quais a porção externa do tubo estava protegida dos ventos dominantes.

A possível explicação para tal constatação é que, uma vez que as extremidades externas dos tubos estão voltadas para cima, o vento atua sobre elas, na maioria dos casos, gerando zonas de pressão negativa, succionando o ar para o exterior da edificação através dos tubos. Como descrito anteriormente, os tubos superiores encontram-se menos expostos ao vento externo, e é nesse conjunto em que observamos a maior quantidade de registros do vento circulando do exterior para o interior pelos tubos. Em contrapartida, os tubos inferiores, mais expostos, apresentaram a maioria dos registros de vazão saindo da edificação por eles.

Essa afirmativa é intensificada, pois a exceção ocorre, justamente para ventos próximos do quadrante sul, no qual a situação se inverte: a extremidade externa dos tubos superiores (voltada para sudeste) fica mais exposta e a dos tubos inferiores (voltada para norte), mais protegida. Nestes casos, ocorreram mais registros de vazão de vento entrando pelos tubos inferiores e saindo pelos superiores.

As influências dos diâmetros e das inclinações dos tubos estudados, bem como da chaminé solar demonstraram um comportamento distinto nos casos da atuação dinâmica do vento e do efeito térmico.

Para estas situações onde o efeito predominante é o dinâmico, os diâmetros dos tubos estudados (100mm e 200mm) mostraram-se pouco influentes na velocidade do ar dentro dos tubos. As retas resultantes da regressão linear para os diâmetros, nos gráficos comparando a velocidade do vento a 10m de altura com a velocidade do ar no interior dos tubos, são paralelas, demonstrando que ambos geraram velocidades do ar nos tubos similares para a mesma velocidade do vento externa.

Avaliando ainda o efeito dinâmico, para as diferentes inclinações encontraram-se valores de velocidade do ar no interior dos tubos significativamente distintos tanto em valores quanto em dispersão quando observamos o gráfico comparando a velocidade do vento a 10m de altura com a velocidade do ar no interior dos tubos. Para este efeito dinâmico, contudo, estas diferenças são atribuídas, principalmente a maior exposição da extremidade externa dos tubos inferiores aos ventos dominantes, por esse ser um fator de grande influência no acréscimo da velocidade do ar no interior dos tubos.

Do ponto de vista térmico, não foi possível um estudo efetivo da influência do diâmetro e da inclinação dos tubos sobre o deslocamento de ar no sistema. Os valores registrados em cada

configuração dos tubos mostraram-se distintos, não permitindo agrupamentos de dados (da mesma forma que o executado para o estudo da ação dinâmica do vento) principalmente no cruzamento de dados entre os tubos inferiores e superiores. A explicação para esta não-conformidade de resultados é que esses conjuntos de tubos apresentam diferentes resistências físicas ao fluxo de ar, desigual variação de alturas e diferentes profundidades do solo (e conseqüentemente diferentes temperaturas médias para a troca de calor). Maiores explicações sobre essa diferença, porém, não é o foco do presente trabalho.

A abertura da chaminé solar determinou um incremento na velocidade do ar no interior dos tubos do ponto de vista da atuação dinâmica do ar (nesse caso, funcionando como um exaustor eólico). Infelizmente, porém, os momentos de calma ocorreram à noite, impedindo um melhor estudo do efeito da chaminé solar (que depende de radiação solar) do ponto de vista térmico. Embora na bibliografia pesquisada não sejam apontados resultados de tal natureza, os poucos registros diurnos e observações em outras edificações que utilizam o sistema demonstram que a influência da chaminé solar é pequena no deslocamento de ar no sistema, principalmente devido à existência de frestas nas edificações. Possivelmente, uma melhor configuração da chaminé solar (como modificação da forma e aumento da altura) e um melhor controle de frestas aumentem sua influência no deslocamento do ar do sistema.

7.2.2 O Desempenho Higrotérmico

O segundo objetivo constituía em avaliar o desempenho higrotérmico da sala na qual está instalado o sistema de ventilação natural por tubos enterrados. Para tanto, comparou-se o seu retardo térmico, a sua temperatura e a sua umidade do ar com o de uma sala de referência e com o do meio externo. O objetivo constituía também a observação da temperatura do ar no interior dos tubos, bem como da velocidade máxima atingida na boca.

No período em que ambos ambientes estavam sem ventilação natural, eles apresentaram uma curva próxima a uma senoidal de variação térmica similar entre si, variando ao redor de uma média que era superior na Sala B (voltado para oeste). A diferença entre essas médias se mostrou maior em períodos de alta radiação e menor em dias de nebulosidade, possivelmente pelo fato da Sala A receber menos radiação inclusive no período da manhã, pois está sombreada pelo bambuzal a leste.

Devido ao pequeno número de dias e a comparação dos ambientes ter ocorrido na primavera, enquanto os estudos com tubos abertos, no verão, essa semelhança não é estatisticamente relevante para as pequenas diferenças de temperatura registradas entre os ambientes. De modo que, não podemos afirmar que houve uma melhora do desempenho higrotérmico com a instalação do sistema de tubos enterrados em relação à sala não ventilada.

Porém, uma vez que ambos os ambientes internos se encontram com temperaturas, na maioria das horas registradas, dentro da faixa de conforto (entre 20° e 29°C), podemos afirmar que o sistema de ventilação por tubos enterrados instalado, pelo menos, não piora tais condições. Essa constatação é importante, uma vez que estamos ventilando o ambiente, permitindo a renovação do ar, juntamente com a remoção de umidade e outras substâncias nocivas geradas no interior dos ambientes, sem prejuízos ao conforto térmico.

O retardo térmico da sala ventilada pelos dutos diminuiu. Este efeito já era esperado, uma vez que estamos ventilando o ambiente com ar externo. Constatou-se, porém, que edificações que apresentam componentes de grande massa térmica são adequadas para o uso do sistema de ventilação natural por tubos enterrados em regiões com grande amplitude térmica diária, uma vez que o pico de temperatura do ar (máxima ou mínima) interna ocorre em situações onde o ar externo já está mais ameno. Apenas ilustrando, as temperaturas máximas no interior da sala ventilada ocorreram às 17 horas, quando a temperatura externa já estava em declínio com o início do entardecer.

Na média, a extremidade interna dos tubos apresentou uma temperatura do ar menor que a medida no interior da sala. Uma vez que estamos tratando da análise de dados no período de verão, essa observação revela que os tubos estão, de maneira geral, resfriando o ambiente. Um estudo mais profundo revela que este resfriamento ocorre primordialmente nas situações diurnas (quando o interior está mais aquecido), e o oposto ocorre em situações noturnas. Ou seja, o sistema de dutos aquece a sala nos períodos frios e a resfria nos períodos quentes, reduzindo sua amplitude térmica.

A umidade do ar registrada no interno das salas foi, em média, maior que a externa na totalidade do período estudado. Como citado anteriormente, as possíveis causas são o contato constante com o talude natural, a cobertura verde e ao início prematuro do experimento, sem o tempo de cura da argamassa. Na grande maioria dos registros, essa umidade interna foi superior a 80% – limite superior de umidade relativa do ar sugerido por Givoni (1992). A umida-

de, somada às altas temperaturas características do período, é a principal causa de desconforto, devido ao agravamento da sensação térmica. Conforme apontado por Mascaró (2001), o único elemento ambiental capaz de amenizar tal desconforto é a ventilação natural. Neste caso, ela pode atuar na redução da umidade interna e no aumento das trocas de calor da pele com o ar, através da convecção natural.

A velocidade do ar interno da edificação ficou controlada durante o período. A maioria dos registros ficou entre os limites de 0,25m/s e 0,5m/s, sendo considerado por Evans e Schiller (1994) como um deslocamento de ar refrescante para o verão. Mesmo as velocidades máximas não gerariam desconforto. Enquanto no exterior foram registrados valores de velocidades acima de 4,0m/s, a velocidade do ar, mesmo medida na boca interna do tubo, não ultrapassou 0,7m/s. Pelos mesmos autores, este valor é colocado entre os limites de refrescante e confortável para a situação de verão, além de estar abaixo do limite máximo de 1,5m/s sugerido para o interior da edificação durante o dia.

7.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O APRIMORAMENTO DO SISTEMA E SOBRE A INTERVENÇÃO DO USUÁRIO

O sistema empregado no Protótipo Ventura é bastante incipiente e carece de mais estudos e de aprimoramentos para seu uso efetivo. Ao longo do estudo, foram constatadas situações que trazem prejuízo ao comportamento do sistema.

Entre elas estão as características construtivas da edificação, que apresenta em suas esquadrias de madeira uma grande quantidade de frestas. Essas frestas reduzem ou anulam a capacidade de extração de ar do recinto da chaminé solar (tanto o atribuído pelo efeito térmico, quanto o pela ação do vento). O estudo mais aprofundado dessa problemática não é o foco deste trabalho. Uma solução plausível para este problema seria a criação de um dispositivo, de preferência não consumidor de energia, ligado diretamente aos tubos (para evitar perdas de carga), que infle o ar para o interior da edificação.

Um segundo problema constatado foi a orientação diferenciada dos tubos. Neste sentido, ocorreu uma série de registros onde o vento que ingressava por um conjunto de tubos passava através da edificação, junto ao piso, e saía pelo outro conjunto, sem ventilar o ambiente. Esse

inconveniente poderia ser facilmente resolvido com o fechamento de um conjunto de tubos ou, no momento em que existam mais estudos sobre o tema, a instalação de apenas uma tubulação com orientação adequada.

Sejam quais forem os problemas e soluções encontradas nos trabalhos futuros sobre o tema, o usuário terá papel fundamental no desempenho do sistema, assim como na maioria dos demais sistemas passivos de condicionamento térmico. Um exemplo prático poderia ser colocado quanto ao fechamento e abertura dos tubos. Como o intuito de melhorar o condicionamento térmico no verão, o ideal seria não ocorrer trocas de ar durante o dia (manter o sistema fechado) e permitir a circulação do ar durante a noite, aproveitando a ventilação noturna. Desse modo, o calor ganho pela edificação durante o dia seria removido durante a noite não apenas pela envoltória da edificação, mas também através da circulação de ar, mantendo sua temperatura interna mais baixa (no caso de verão) durante todas as 24 horas do dia.

7.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

As considerações apresentadas nos capítulos anteriores podem embasar ou servir de referência para vários outros trabalhos de pesquisa. Como sugestões para estes estudos, são indicados, inclusive, alguns temas distintos deste trabalho, mas que estão relacionado com o Protótipo Ventura, que poderão ser explorados por outros pesquisadores:

- a) como a edificação é simétrica, e de características idênticas, poderia se comparar, no Protótipo Ventura, a variação de temperatura das salas da Administração (a leste) e a dos Sanitários (a oeste), para avaliar a influência da orientação no desempenho térmico de ambientes construídos;
- b) a cobertura verde instalada é outra possível fonte de pesquisas, tanto do ponto de vista térmico e hídrico, quanto do ponto de vista biológico, com o estudo dos tipos de forração vegetal mais propícia;
- c) um terceiro estudo sobre a edificação seria o comportamento térmico e hídrico de edificação, executada em contato com talude (sistema geotérmico de contato direto);

Sobre o tema da ventilação dos tubos enterrados:

- a) é importante um monitoramento mais aprofundado, isolando cada um dos parâmetros, torna-se possível e de grande valia. O estudo de velocidade e direção do vento poderia ser simulado com maquete em túnel de vento, permitindo observar, inclusive, diferentes orientações dos tubos. A diferença de temperatura, porém, deveria contemplar uma maior quantidade de inclinações, além de estudar a estação quente e a fria;
- b) avaliar a possibilidade e criar um modelo matemático para sistemas de ventilação por tubos enterrados também é uma possibilidade. É necessário colocar que, uma vez que todos os sistemas similares utilizam fontes mecânicas de energia para a circulação de ar, o novo modelo deve levar em condição as variáveis climáticas;
- c) o estudo de uma maior quantidade de diâmetros e quantidade de tubos, bem como de uma maior variedade de inclinações e sua influência no deslocamento de ar dentro do sistema;
- d) a bibliografia aponta a condensação interna dos tubos uma problemática. Este efeito não foi encontrado no verão. Estudos levando em consideração essa variável, no inverno, poderiam ser analisados;
- e) uma medição por um período prolongado para o aprofundamento das características de conforto geradas pelos tubos, ao longo do ano, podendo inclusive abranger o período de uso da sala, para verificar a influência de pessoas e equipamentos na geração de calor;
- f) uma observação feita durante o experimento, que poderia ser tema de estudos, é o controle do ruído no interior da edificação, uma vez que o fechamento das esquadrias possibilita a redução dos mesmos.
- g) outra carência da bibliografia, que poderia ser tema de trabalhos futuros, são estudos relativos à implantação do sistema, tais como, técnicas, detalhes construtivos, impermeabilização, possíveis problemas de condensação, dificuldade de limpeza e proliferação de microorganismos no interior dos tubos;

REFERÊNCIAS

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.** – ASHRAE: handbook of fundamentals. New York, USA. 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Instalações centrais de ar condicionado para conforto: Parâmetros básicos de projeto: **NBR 6401**. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Instalações centrais de ar condicionado para conforto: Parâmetros básicos de projeto: **NB-10 152/87**. Rio de Janeiro, 1987.
- AROZTEGUI, J. **Parâmetros do Conforto Térmico de Porto Alegre**. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1977.
- BARBOSA, M. **Uma Metodologia para Especificar e Avaliar o Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- BECKER, M. **Análise de Desempenho Térmico de uma Habitação Unifamiliar Térrea**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1993.
- BOJIÉ, M.; PAPADAKIS, G.; KYRITSIS, S. Energy from a two-pipe, earth-to-air heat exchanger. In: **Energy**, n. 24, p. 519-523, 1997.
- BOULARD, T. BAILLE, A., Simulation and Analysis of Soil Heat Storage Systems for a Solar Greenhouse. I-Analysis. In.: **Energy in Agriculture**, vol. 5 p. 175-184, 1986
- CHEN, B.; WANG, T.; MALONEY, J.; NEWMAN, M. Measured and Predicted Cooling Performance of Earth Contact Cooling Tubes. In.: **Proceedings of Annual Meeting**. 1983, Minneapolis. Anais... Minneapolis: ASES.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Consulta Dados da Estação Automática: PORTO ALEGRE (RS)**, 200-. Disponível em: <<http://venus.inmet.gov.br>>. Acesso em 21 jul 2006.
- COSTA, E. **Arquitetura Ecológica: condicionamento térmico natural**. São Paulo: Edgar Blücher, 1982.
- COSTA, E. Arquitetura Ecológica. In.: **Seminário de Arquitetura Bioclimática**. Rio de Janeiro: 1983.
- ELMER, D.; SCHILLER, A. A Preliminary Examination of the Dehumidification Potential of Earth-Air Heat Exchangers. In.: **Proceedings of 1st National Passive Cooling Conference**. 1981, Miami. Anais... Miami: . p. 161-165.
- EVANS, J.; SCHILLER, S. Teaching architects low energy and climate conscious design. In.: **Renewable Energy**, vol. 5, p. 1147-1150, 1994.

FERREIRA, D. **Migração de Umidade Causada por Gradientes Térmicos entre Duas Fronteiras Impermeáveis Contendo um Meio Poroso Não Saturado**. 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FERRARO, L.; HASENACK, H. Aspectos do Clima de Porto Alegre. In.: ZURITA, M.L.L.; TOLFO, A.M. (Org.). **A Qualidade do Ar em Porto Alegre. Porto Alegre**, Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2000. p. 16-27.

FIGUEIRA, D. **Análise Experimental e Numérica do Comportamento Térmico de um Coletor Solar Acumulador**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.

FIGUEIREDO, D. **Vikings: Mais que um povo, um ideal**, 200-. Disponível em: <www.klepsidra.ne>. Acesso em 7 jan. 2005.

FISK, W.; TURIEL, I. Residential Air-to-Air Heat Exchangers: Performance, Energy Savings and Economics. In.: **Energy and Buildings**, vol. 5, p. 197-211, 1982.

FISK, W.; TURIEL, I. **Heat Exchangers: Performance, Energy Savings and Economics**, 1995.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. São Paulo: Nobel, 1988.

FULLGAUGE Eletro Eletrônicos LTDA. Porto Alegre / Brasil, 200-. Disponível em: <www.fullgauge.com.br>. Acesso em 15 abr 2006.

GAUTHIER, C.; LACROIX, M.; BERNIER, H. Numerical Simulation of Soil Heat Exchanger-storage Systems for Greenhouses. In.: **Solar Energy**, vol. 60, n.6, p. 333-346, 1997.

GIVONI, B. Comfort, Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n.1. p. 11-23, 1992.

GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture**. 2.ed. London: Applied Science Publishers. 1976. reimpresso em 1981.

GRIMM, A. **Meteorologia Básica**. 200-. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>> Acesso em 27 jul. 2005.

GOULART, S. **Dados Climáticos para Avaliação de Desempenho Térmico de Edificações em Florianópolis**. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 1993.

HAZER, H. The use of Earth Covered Buildings. In.: **Proceedings of Conference on Alternatives in Energy Conservation: The use of Earth-Covered Buildings**. 1975, Texas. Anais... Texas: US GPO. p. 21-36, 1975.

HOLLMULLER, P.; LACHAL, B. Cooling and preheating with buried pipes system: monitoring, simulation and economic aspects. In: **Energy and Buildings**, n. 33, p. 509-518, 2001.

HOLLMULLER, P. Analytical characterization of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers. In.: **International Journal of Heat and Mass Transfer**, n. 46, p. 4303-4317, 2003.

HOLLMULLER, P. Resfriamento passivo de edificações através de sistemas de ventilação inercial. In: **Videoconferência LABEEE – CEPEL**. 2004, Florianópolis.

International Ground Source Heat Pump Association – IGSHPA, 200-. Disponível em: <<http://www.igshpa.okstate.edu>>. Acesso em 6 jul. 2005.

JACOVIDES, C.; MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; LEWIS, J. On the Ground Temperatures Profiles for Passive Cooling Application in Buildings. In.: **Solar Energy**, vol. 51, n. 3, p. 167-175, 1996.

KABASHNIKOV, V.; DANILEVSKII, L.; NEKRASOV, V.; VITYAZ, I. Analytical and numerical investigation of the characteristics of a soil heat exchanger for ventilation system. In: **International Journal of Heat and Mass transfer**, n. 45, p. 2407-2418, 2002.

KURPASKA, S.; SLIPEK, Z.; BOZEK, B.; FRACZEK, J. Simulation of Heat and Moistures Transfer in the Greenhouse Substrate due to a Heating System by Buried Pipes. In.: **Biosystems Engineering**, vol. 90, p. 63-74, 2004.

LABORATORI DI STRUMENTAZIONE INDUSTRIALE (LSI). **BABUC/A/M**. strumento portatile per l'acquisizione, visualizzazione, memorizzazione ed elaborazione di grandezze ambientali, 200-. Disponível em: < http://www.lsi-lastem.it/GB_default.asp>. Acessado em 15 abr 2005.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC). Ventilação Natural de Edifícios de Habitação. **Proc° 080/1/10382**. Departamento de Edifícios: Lisboa, 1994.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A. P. **Conforto Térmico e Estresse Térmico**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE), 2002.

LAMBERTS, R.; PEREIRA, F.; DUTRA, L. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2. ed. São Paulo: PW Editores, 1997. reimpresso em 2004.

LARSEN, S; FIPIPPÍN; C. LESINO; G. Earth-to-air Exchange through a Buried Pipe at a School in La Pampa, Argentina. In: **Proceeding of 20th Conference on Passive and Low Energy Architecture**. 2003, Santiago. Anais n.3, Santiago: PLEA. p. 893-898, 2003.

Código de Edificações de Porto Alegre. LC nº. 284 de 27/10/1992. Porto Alegre: Câmara Municipal, 1992. Brasil.

LENGEN, J. **Manual do Arquiteto Descalço**. Porto Alegre: Livraria do Arquiteto; Rio de Janeiro: TIBÁ, 2004.

- LEVIT, J.; GASPAR, R.; PIACENTINI, R. Simulation of greenhouse microclimate by earth tube heat exchangers. In.: **Agriculture Forest Meteorological**, n. 47, p. 31-47, 1989.
- LOMBARDI, H. **Simulação Numérica da Transferência Simultânea de Energia e Umidade através do Solo em um Sistema Trocador-Armazenador de Calor**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MASCARÓ, L.; MUSSKOPF, D.; MARTINS, L.; KUHN, E.; SARAIVA, J.; CAVALCANTI, P. **Ventilação Natural**. (Relatório de Conclusão de Pesquisa) Programa de Pós Graduação em Arquitetura. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. Modeling the Earth temperature using Multilayer Measurements. In.: **Energy and Buildings**, n. 9, p. 1-9, 1992.
- MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; The Influence of Different ground Covers on the Heating Potential of Earth-to-Air Heat Exchangers. In.: **Renewable Energy**, Vol. 7, n. 1, p. 33-46, 1996.
- MORENO, J. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria de Agricultura, 1961.
- MOTA, F.; BELSDORF, M.; GARCEZ, J. Zoneamento Agroclimático do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In.: **Normas Agroclimáticas**. Pelotas: Ministério da Agricultura, vol 1, p. 80. 1971
- MOTTA, A.; YOUNG, A. The predicted performance of buried pipe cooling system for hot humid climates. In.: **Proceeding of Solar Engineering Conference**. 1985, Tennessee. Anais... Tennessee: Solar Engineering Conference.
- NIMER E. Clima. In.: **Geografia do Brasil, Região Sul**. Vol. 2, p.151-157. Rio de Janeiro: IBGE. 1990.
- OLIVEIRA, Gilson. **Antigas camadas revelam uma cidade desconhecida**. 200-. Notícia do NetHistória. Disponível em: <www.nethistoria.com>. Acesso em 7 jan. 2005.
- PESCE, A. **Geotermia**. 2003. Disponível em: <<http://www.ciar-lda.com/geo/geotermia.html#topicos>>. Acesso em 7 nov 2004.
- PURI, M. Feasibility and Performance Curves for intermittent Earth Tube Heat Exchangers. In: **Society of Agricultural and Biological Engineers**, vol. 29, p. 526-532, 1986.
- RIVEIRO, R. **Arquitetura e Clima: Acondicionamento Térmico Natural**. 2. ed. Porto Alegre: D.C. Luzzato, 1985
- RODRIGUEZ, E.; CJUDO, M.; ALVAREZ, S. Earth-tube systems performance. In.: **Proceedings of CIB Meeting, Air Quality and Air Condition**. 1988. Paris. Anais... Paris: CIB.
- SCHILLER, G. **Earth Tubes for Passive Cooling**: The development of a transient numerical model for predicting the performance of earth/air heat exchangers. 1982. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – MIT. Estados Unidos.

- SANTAMOURIS, M.; LEFAS, C. Thermal analysis and computer control of hybrid greenhouse with heat storage. In: **Energy Agriculture**, n. 5, p. 161-173, 1986.
- SANTAMOURIS, M.; MIHALAKAKOUS, G.; BALARAS, C.; ARGIRIOU. Use of Buried Pipes for Energy Conservation in Cooling of Agricultural Greenhouses. In: **Solar Energy**, Vol. 55, n. 2, p. 111-124, 1995.
- SANTAMOURIS, M.; MIHALAKAKOUS, G.; BALARAS, C.; LEWIS, J. Energy Conservation in Greenhouses with Buried Pipes. In: **Energy**, vol. 21, n. 5, p. 353-360, 1996.
- SODHA, M.; GOYAL, I.; BANSAL, P.; KUMAR, A. Temperature Distribution in an Earth-Air Tunnel System. In:..., 1984.
- STRECK, E.; GIASSON, E.; KAMPF, N. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2002.
- TOLEDO, A. **Ventilação Natural e Conforto Térmico em Dormitórios: Aspectos Bioclimáticos para uma Revisão do Código de Obras e Edificação de Maceió**. 2001. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pós Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- TSELPIDAKI, I.; SANTAMOURIS, M.; MELITSIOTIS, D. Analysis of the Summer Ambient Temperatures for Cooling Purposes. In.: **Solar Energy**, vol. 50, n.3, p. 197-204, 1993.
- TZAFERIS, A.; LIPARAKIS, D.; SANTAMOURIS, M.; ARGIRIOU, A. Analysis of the Accuracy and Sensitivity of Eight Models to Predict the Performance of earth-to-air heat Exchanger. In.: **Energy and Buildings**, vol. 18, p. 35-43, 1992.
- UBER, L.L. **A Climatologia Aplicada ao Ambiente Construído: uma contribuição à caracterização climática de Porto Alegre / RS**. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.
- VAZ, J; SATTLER, M. **O Uso de Energia Geotérmica para Condicionamento Térmico de Ambientes Construídos no Sul do Brasil**. 2004. Projeto de Pesquisa para Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre.
- Vila Ventura**, 200-. Disponível em: <<http://vilaventura.com.br>>. Acesso em 10 ago. 2005.
- WEIMER, G. **A arquitetura**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 1992. 144p.
- YIN, R.; **Estudo de Caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2005.