

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO SOBRE O USO DO
SOLO COMO RESERVATÓRIO DE ENERGIA PARA O
AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO DE AMBIENTES
EDIFICADOS

JOAQUIM VAZ

PORTO ALEGRE
2011

JOAQUIM VAZ

**ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO SOBRE O USO DO
SOLO COMO RESERVATÓRIO DE ENERGIA PARA O
AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO DE AMBIENTES
EDIFICADOS**

“Tese 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 Doutor em Engenharia. Orientação: Prof. PhD. Miguel Aloysio Sattler”.

PORTO ALEGRE

2011

V393e Vaz, Joaquim

Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificados / Joaquim Vaz. – 2011.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2011.

Orientação: Prof. Dr. Miguel Aloysio Sattler

1. Simulação numérica. 2. Radiação solar. 3. Aproveitamento de energia. 4. Trocador de calor. 5. Construção civil. I. Sattler, Miguel Aloysio, orient. II. Título.

CDU-69(043)

JOAQUIM VAZ

**ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO SOBRE O USO DO
SOLO COMO RESERVATÓRIO DE ENERGIA PARA O
AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO DE AMBIENTES
EDIFICADOS**

“Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Construção Civil, e 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, 07 de janeiro de 2011.

ORIENTADOR

Prof. Miguel Aloysio Sattler
PhD. pela University of Sheffield

COORDENADOR DO PPGEC/UFRGS
Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

BANCA EXAMINADORA

Prof. Aloísio Leoni Schmid (UFPR)
Dr. pela Universidade de Karlsruhe - Alemanha

Prof. Inácio Benvegno Morsch (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Luiz Alberto Oliveira Rocha (UFRGS)
PhD. pela Universidade de Duke - USA

Prof. Paulo Renato Perez dos Santos (PUC/RS)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho às minhas filhas maravilhosas **Joana e Jordana**.
Minha amada esposa **Marta**.
Minha querida mãe **Suely** e meu saudoso pai **Daniel**.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi longo, exigiu paciência e dedicação de todos que com ele se envolveram. Tenho certeza que só foi possível chegar aqui com a ajuda deles. Agradeço a todos:

- o Prof. Sattler, pela oportunidade do doutoramento, pela orientação sempre competente e eficiente, pela compreensão e confiança no processo, pela amizade que se consolidou;
- o Samuel, o Saulo, o Daniel, o Cícero, o Arno e, em nome deles, a todos do Eco-Resort Vila Ventura, que foram grandes parceiros no trabalho e se tornaram amigos para sempre;
- o Prof. Paulo Renato, o Airton, o Jaqueval e, em nome deles, a todos do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Termofluidodinâmica Aplicada da PUCRS, velhos amigos que esbanjaram dedicação e conhecimento no apoio a montagem e gerência do experimento. Em especial, agradeço mais uma vez ao Prof. Paulo Renato, meu cunhado, por tudo que representou e fez nesta caminhada;
- os colegas de pós-graduação no NORIE, em especial ao Diego que ao desenvolver seu trabalho desbravou o caminho experimental deste estudo;
- a todos os demais professores e funcionários do NORIE, que são protagonistas neste espaço diferenciado de produção de conhecimento e formação de profissionais na área da construção civil;
- a todos na FURG, que garantiram o espaço necessário para o estudo, em especial o amigo Décio, velho parceiro no dia-a-dia de trabalho que se dedicou em tornar meu tempo livre para este estudo;
- o Liércio pelo companheirismo de anos, antes como meu aluno, agora como meu mestre. Sem a orientação e a experiência do Liércio não teria sido possível responder ao desafio gerado no exame de qualificação, de incluir no estudo a modelagem computacional;
- o Prof. Luiz Rocha, o Prof. Jeferson e o Elizaldo pela competência e disponibilidade em ajudar na análise dos processos e procedimentos nas simulações numéricas do estudo;
- o bolsista Rodrigo Matielle, parceiro de várias horas de trabalho na planificação do experimento, usando sua habilidade no desenho com CAD;
- o Prof. Cezar Bastos (FURG) e o Prof. Élvio Giasson (UFRGS) pela disposição em ajudar no estudo, identificando o solo de Viamão e seus índices físicos;
- a minha irmã Maria Ângela, pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis ao longo destes anos. Pela paciência em me escutar e sempre me dar razão;
- o CNPq pelo apoio financeiro para a compra de equipamentos e montagem do experimento;
- a Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO-RS) pelo apoio ao gentilmente ceder dados de temperatura do solo de seus arquivos a pesquisa;
- a Amanco do Brasil pela parceria ao fornecer gratuitamente dutos e conexões para o experimento;

É muito bom saber que podemos contar com as pessoas, que seremos ouvidos, que teremos com quem partilhar nossas angústias e necessidades. Muito obrigado!

Joaquim Vaz

RESUMO

VAZ, Joaquim. **Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificados**. 2011. 235 f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

Objetivos: Este trabalho, abrangendo a área da transferência de calor e da mecânica dos fluidos, em seu desenvolvimento envolveu métodos analíticos, numéricos computacionais e experimentais (em ambiente de campo), com a finalidade de analisar o uso de trocadores de calor solo-ar, como estratégia para diminuir o consumo de energia convencional, no aquecimento ou resfriamento de ambientes construídos. Assim, um dos objetivos do estudo foi avaliar, com base em resultados experimentais, a performance do solo como um reservatório de energia, derivada da radiação solar. Buscou-se, pois, identificar parâmetros, procedimentos e condições favoráveis envolvendo esta estratégia. O outro objetivo do estudo foi, usando os *softwares* GAMBIT e FLUENT, modelar computacionalmente o escoamento do ar no trocador de calor solo-ar. **Método:** O estudo experimental e numérico foi precedido pela construção de uma edificação, especificamente concebida para a pesquisa, identificada como Casa Ventura. Em continuidade, foram enterrados dutos no solo, que conduziram ar exterior e água (esta última por um período limitado) ao ambiente interno. No caso da condução de ar, o solo funcionaria como um reservatório de energia, aquecendo ou resfriando a ar. Já, no caso da condução de água, prevista com duto de baixa condutividade térmica, o solo funcionaria apenas como um protetor à radiação solar, para preservar as características térmicas da água, desde um reservatório, de onde a mesma era bombeada, até o interior da casa. Na Casa Ventura foram construídos dois ambientes centrais com características dimensionais e de envolvente equivalentes, constituindo os ambientes monitorados no processo, sendo um, na condição natural, referencial, sem renovação de ar, e o outro, com renovação de ar. Na parte experimental, o ar foi captado do ambiente externo e insuflado por um ventilador nos dutos enterrados, renovou o ar no interior deste último ambiente. Com ajuda de um *fan-coil*, colocado neste ambiente, o ar renovado trocou calor com a água. Por questões de dificuldades operacionais, o bombeamento de água funcionou por um período muito curto. Durante o experimento, que se desenvolveu por todo o ano de 2007, foram monitoradas e registradas, além da temperatura do solo e da água, a temperatura e a umidade: do ar externo, do ar nos ambientes internos e do ar em escoamento nos dutos enterrados, bem como a velocidade de escoamento nos mesmos. **Resultados:** De forma geral, o potencial do solo para aquecer foi maior do que o de resfriamento do ar injetado nos dutos enterrados. O potencial de aquecimento foi mais destacado nos meses de maio, junho, julho e agosto, e se mostrou maior que 3K. Para profundidades entre 2 e 3m, estima-se que o potencial possa ser superior a 8K. Por outro lado, o potencial de resfriamento foi maior nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro, mas foi baixo para pequenas profundidades (menos de um metro). Para resfriamento, este potencial pode chegar a 4K. **Contribuições da pesquisa:** Face aos resultados da pesquisa, diversas foram as suas contribuições, dentre as quais se destacam: a construção de um banco de dados experimentais sobre as propriedades e características do solo (índices físicos, difusividade térmica, capacidade térmica volumétrica, condutividade térmica, temperatura e umidade) e do ar ambiente (temperatura e umidade) para o município de Viamão, localizado na região sul do Brasil, e que pode ser usado para a continuidade desta pesquisa ou para a elaboração de novas pesquisas e projetos; e o desenvolvimento de uma metodologia para a modelagem computacional de trocadores de calor solo-ar, validada através dos dados experimentais citados acima, possibilitando, assim, o emprego deste procedimento numérico, para a elaboração de projetos ou novas pesquisas nesta área.

PALAVRAS-CHAVE: Temperatura do solo; Trocador de calor solo-ar; Aproveitamento da energia da radiação solar; Simulação numérica; FLUENT.

ABSTRACT

VAZ, Joaquim. **Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificados**. 2011. 235 f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

Purpose: The development of the present work, comprising the area of heat transfer and fluids mechanics involved analytical, numerical computational and experimental (in field environment) methods, with the purpose of analyzing the use of earth-to-air heat exchanger, as a strategy to reduce conventional energy consumption, for the heating or cooling of built environments. Thus, one of the study purposes was to evaluate, based on experimental results, the earth performance as an energy reservoir, derived from solar radiation incidence on the surface of the ground. We aimed, then, at identifying favorable parameters, procedures and conditions involving this strategy. The other study purpose was, using the GAMBIT and FLUENT *softwares*, computationally modeling the air flow in the earth-to-air heat exchanger. **Method:** The experimental and numerical study was preceded by the construction of a building, specially planned for the research, called Casa Ventura. As a follow-up, ducts were buried on the ground, to conduct external air and water (the latter one for a limited period) to the internal environment of the house. In terms of air conduction, the earth would work as an energy reservoir, heating or cooling the air. Concerning the water conduction, planned to use a duct of low thermal conductivity, the earth would only work as a protector from solar radiation, to preserve the water thermal characteristics, when flowing from the water reservoir, where it would be taken from, to the inside of the house. At Casa Ventura two central environments were built with similar dimensional and envelope characteristics, constituting the environments monitored in the process, in which, one in the natural and referential condition, without air renovation, and the other, with air renovation. In the experimental part, the air was captured from the external environment and inflated by a fan in the buried ducts, and it renovated the air inside this latter environment. With the help of a *fan-coil*, placed in this environment, the renovated air exchanged heat with the water flowing through the ducts. Due to some operational difficulties, the pumping of water lasted for a very short period. During the experiment, which lasted through the whole year of 2007, besides the water and earth temperature, the temperature and humidity of the following were also monitored and registered: the external air, the air in the internal environments and the air flowing in the buried ducts, as well as the flowing speed of the different fluids. **Results:** In a general way, the earth potential to heat was higher than the cooling of air injected in the buried ducts. The heating potential was higher in the months of May, June, July and August, doing so by more 3K. For depths between 2 and 3m, it is estimated that the potential might be over 8K. On the other hand, the potential for cooling was higher in the months of January, February and December, but it was low for low depths (less than a meter). For cooling, this potential may reach 4K. **Research contributions:** Considering the research results, several were the contributions, among which we highlight: the construction of an experimental database on the earth properties and characteristics (physical indexes, thermal diffusivity, volumetric heat capacity, thermal conductivity, temperature and humidity) and the environmental characteristics of the air (temperature and humidity) for the city of Viamão, located in Southern Brazil, and that may be used for the continuation of this research or for the elaboration of new researches and projects; and the development of a methodology for computational modeling of earth-to-air heat exchangers, validated through the experimental data mentioned before, enabling, therefore, the use of this numerical procedure for the elaboration of projects or new researches in this area.

KEY WORDS: Earth temperature; Earth-to-air heat exchanger; Solar radiation energy use; Numerical simulation; FLUENT.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONTEXTO DA PESQUISA	19
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA	20
1.3	OBJETIVOS DO ESTUDO	22
1.4	DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES	24
1.5	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	25
2	METODOLOGIA DE PESQUISA	26
2.1	ESTRATÉGIA DE PESQUISA	26
2.2	DELINEAMENTO DA PESQUISA	28
2.2.1	Revisão de literatura	30
2.2.2	Pesquisa experimental	30
2.2.3	Índices físicos do solo	34
2.2.4	Apresentação e análise dos resultados experimentais	34
2.2.5	Pesquisa numérica	35
2.2.6	Resultados experimentais x resultados numéricos	37
3	REVISÃO DE LITERATURA	38
3.1	COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO E TROCADORES DE CALOR SOLO-AR	38
3.1.1	Comportamento térmico do solo	40
3.1.2	Trocadores de calor solo-ar	43
3.2	REGIME TÉRMICO DO SOLO	59
3.2.1	Equação geral do calor	60
3.2.2	Difusão do calor no solo	63

3.2.3	Equações da difusividade térmica do solo	73
3.3	FUNDAMENTOS DA ABORDAGEM COMPUTACIONAL.....	74
3.3.1	Conservação da massa	77
3.3.2	Conservação da quantidade de movimento	77
3.3.3	Conservação da energia	78
3.3.4	Modelagem da turbulência.....	79
3.3.5	Acoplamento pressão-velocidade	82
4	DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL.....	83
4.1	ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS NA PESQUISA	83
4.2	LOCAL DA PESQUISA	85
4.3	APRESENTAÇÃO DO EXPERIMENTO	85
4.4	DESCRIÇÃO FÍSICA DO EXPERIMENTO	88
4.4.1	Projeto da Casa Ventura.....	89
4.4.2	Construção da Casa Ventura.....	95
4.4.3	Reservatório de água.....	95
4.4.4	<i>Fan-coil</i> - ambiente <u>A</u>	95
4.4.5	Escavações no solo.....	99
4.4.6	Rede de dutos para circulação de água	99
4.4.7	Rede de dutos para circulação de ar.....	101
4.4.8	Ar de renovação - ambiente <u>A</u>	102
4.4.9	Ar de renovação - ambiente <u>B</u>	102
4.4.10	Captação do ar externo.....	103
4.4.11	Tubulações, para as redes, de dados e elétrica.....	105
4.4.12	Alimentação elétrica do experimento	107
4.5	ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO NO VILA VENTURA.....	109

4.6	INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS	110
4.6.1	Dados de temperatura e umidade	110
4.6.2	Sistema Sitrad – gerência dos dados de temperatura e umidade	110
4.6.2.1	<i>Software</i> Sitrad	111
4.6.2.2	Descrição do sistema Sitrad	112
4.6.3	Sensores nos trocadores de calor solo-ar	119
4.6.4	Sensores no ambiente externo.....	121
4.6.5	Sensores no reservatório de água.....	122
4.6.6	Sensores no subsolo	123
4.6.7	Sensores no duto de circulação de água.....	123
4.6.8	Sensores no ventilador – ar do bambuzal	123
4.6.9	Sensores nos ambientes <u>A</u> e <u>B</u>	124
4.6.10	Sensores junto ao <i>fan-coil</i> – circulação de ar	124
4.6.11	Operação do sistema Sitrad.....	124
4.7	VAZÃO DE AR NOS DUTOS ENTERRADOS.....	125
4.8	VAZÃO DE ÁGUA NO <i>FAN-COIL</i>	126
5	RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	128
5.1	DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO SOLO	129
5.2	CAPACIDADE TÉRMICA VOLUMÉTRICA DO SOLO	134
5.3	CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO.....	135
5.4	VAZÃO DE AR NOS TROCADORES DE CALOR SOLO-AR	135
5.5	VAZÃO DE ÁGUA NO <i>FAN-COIL</i>	137
5.6	DADOS DE TEMPERATURA E UMIDADE	137

5.6.1	Dados do ar do ambiente externo.....	138
5.6.2	Temperaturas do ar no ventilador	143
5.6.3	Temperaturas do solo.....	145
5.6.4	Temperaturas do ar nos trocadores de calor solo-ar	161
5.6.5	Temperaturas da água no reservatório	180
5.6.6	Temperaturas da água entre o reservatório e o <i>fan-coil</i>	182
5.6.7	Temperaturas do ar interno aos ambientes <u>A</u> e <u>B</u>	184
5.7	TEMPERATURAS PREVISTAS PARA O SOLO DE VIAMÃO ...	194
6	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	198
6.1	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	198
6.2	ANÁLISE DOS PERFIS DE TEMPERATURA DO AR NOS TROCADORES DE CALOR SOLO-AR.....	207
6.2.1	Ilustração típica de um dia de verão	213
6.2.2	Ilustração típica de um dia de inverno	215
6.3	COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO NÃO PERTURBADO	216
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	220
7.1	ETAPA DO EXPERIMENTO.....	220
7.2	ETAPA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	226
7.3	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	228
	REFERÊNCIAS	231

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de pesquisa.....	26
Figura 2: Delineamento da pesquisa	29
Figura 3: Volume finito para dedução da equação do calor.....	61
Figura 4: Solo semi-infinito	64
Figura 5: Temperaturas no solo.....	70
Figura 6: Fluxo de calor no solo	72
Figura 7: Ilustração do experimento	86
Figura 8: Implantação do experimento.....	90
Figura 9: Perspectiva da Casa Ventura	91
Figura 10: Fachada da Casa Ventura	92
Figura 11: Planta baixa da Casa Ventura	93
Figura 12: Corte transversal da Casa Ventura.....	94
Figura 13: Casa Ventura – execução das paredes	96
Figura 14: Casa Ventura – estrutura da cobertura.....	96
Figura 15: Casa Ventura – execução da cobertura.....	97
Figura 16: Casa Ventura.....	97
Figura 17: Reservatório de água	98
Figura 18: <i>Fan-coil</i> – instalação no Ambiente <u>A</u>	98
Figura 19: Escavações para colocação dos dutos.....	99
Figura 20: Tubulação d'água – recalque e retorno.....	100
Figura 21: Tubulação de ar – dutos <u>A</u> e <u>B</u>	101
Figura 22: Tubulação de ar – duto <u>C</u>	103
Figura 23: Ventilador – sucção protegida por filtro (tela)	104
Figura 24: Interligação do ventilador aos dutos enterrados	104
Figura 25: Implantação das tubulações, para redes, de dados e rede elétrica	106

Figura 26: Rede de dados e rede elétrica.....	108
Figura 27: Controlador MT 530 - <i>Full Gauge</i>	110
Figura 28: Controlador TC 900 - <i>Full Gauge</i>	111
Figura 29: Funcionamento do Sitrad.....	112
Figura 30: Centros de distribuição – CDC1 e CDC2.....	113
Figura 31: Centro de distribuição – CDC3	113
Figura 32: Implantação dos controladores e sensores de temperatura e umidade	117
Figura 33: Corte longitudinal – dutos de água e ar	118
Figura 34: Cavaletes para instalação dos sensores nos dutos de ar.....	120
Figura 35: Esquema de montagem do cavalete.....	120
Figura 36: Dispositivo para medida da temperatura e umidade do ar externo.....	121
Figura 37: Bainha metálica para proteção dos sensores no reservatório d'água.....	122
Figura 38: Rotâmetro de linha, usado no experimento	127
Figura 39: Variações de temperaturas no solo de Viamão – FEPAGRO.....	132
Figura 40: Difusividade térmica do solo de Viamão.....	134
Figura 41: Posições de medidas da velocidade do ar nos dutos.....	136
Figura 42: Variação da temperatura do ar ambiente de Viamão.....	139
Figura 43: Temperaturas máximas e mínimas diárias do ar ambiente de Viamão	139
Figura 44: Valores médios diários da umidade relativa do ar ambiente de Viamão.....	140
Figura 45: Variação horária da temperatura do ar ambiente de Viamão	143
Figura 46: Variação da temperatura do ar na área do bambuzal.....	144
Figura 47: Temperaturas do ar no ventilador	145
Figura 48: Temperatura média diária, no solo de Viamão, com a profundidade.....	148
Figura 49: Diferença entre as temperaturas médias diárias no solo e do ar externo	149
Figura 50: Variação $T_{\text{solo}} - T_{\text{ar ext}} \rightarrow$ amplitude total e defasagem	150
Figura 51: Temperaturas no solo e do ar externo de Viamão – dias de janeiro.....	153
Figura 52: Temperaturas no solo e do ar externo de Viamão – dias de julho.....	155

Figura 53: Médias, no mês, da diferença entre as temperaturas no solo e do ar externo.....	158
Figura 54: Horas do dia, com $T_{\text{solo}} - T_{\text{ar ext}}$ positivo ou negativo.....	160
Figura 55: Temperaturas do ar em escoamento no duto <u>A</u>	163
Figura 56: Temperaturas do ar em escoamento no duto <u>B</u>	164
Figura 57: Temperaturas do ar em escoamento no duto <u>C</u>	165
Figura 58: Variação diária da temperatura do ar em escoamento no duto <u>A</u>	167
Figura 59: Variação diária da temperatura do ar em escoamento no duto <u>B</u>	169
Figura 60: Variação diária da temperatura do ar em escoamento no duto <u>C</u>	171
Figura 61: Valores médios, no mês, da diferença $T_{\text{ar duto A}}(x=34,0\text{m}) - T_{\text{ar duto A}}(x=11,0\text{m})$	173
Figura 62: Temperaturas: ar no duto <u>A</u> x potencial (solo 2,0m x ar externo).....	174
Figura 63: Comparação: ar no duto <u>A</u> x potencial (solo 2,0m x ar externo).....	175
Figura 64: Valores médios, no mês, da diferença $T_{\text{solo } 2,00\text{m}} - T_{\text{ar duto A}}(\text{média} - \text{trecho central})$	178
Figura 65: Temperaturas: ar no duto <u>A</u> x potencial (solo 2,0m x ar duto <u>A</u>).....	178
Figura 66: Comparação: ar no duto <u>A</u> x potencial (solo 2,0m x ar duto <u>A</u>).....	179
Figura 67: Variações de temperatura da água no reservatório.....	180
Figura 68: Potencial térmico da água do reservatório em relação ao ar externo.....	181
Figura 69: Variação da temperatura da água entre o reservatório e o <i>fan-coil</i>	183
Figura 70: Variações de temperaturas do ar no ambiente <u>A</u> e no ambiente <u>B</u>	185
Figura 71: Comparação, entre médias diárias das temperaturas, nos ambientes <u>A</u> e <u>B</u>	186
Figura 72: Variação diária da temperatura nos ambientes <u>A</u> e <u>B</u>	187
Figura 73: Variação diária da temperatura no ambiente <u>A</u>	188
Figura 74: Comparação, entre as temperaturas do ar, de renovação e do ambiente interno.....	189
Figura 75: Potencial do ar de renovação para aquecer ou resfriar o ar do ambiente <u>A</u>	190
Figura 76: Variação da temperatura do ar, ao passar no <i>fan-coil</i>	191
Figura 77: Temperatura estimada do ar no ambiente <u>A</u>	192
Figura 78: Comparações com a temperatura estimada para o ambiente <u>A</u>	193
Figura 79: Variação de temperatura no solo de Viamão.....	196

Figura 80: Temperaturas no solo - valores teóricos x valores experimentais	197
Figura 81: Domínio computacional	199
Figura 82: Traçado dos dutos	200
Figura 83: Representação esquemática do conjunto solo e dutos	201
Figura 84: Malha e identificação das condições de contorno	202
Figura 85: UDF da variação de temperatura na superfície do solo.....	204
Figura 86: Temperatura do ar em escoamento no duto <u>A</u> – ciclo anual.....	208
Figura 87: Temperatura do ar em escoamento no duto <u>B</u> – ciclo anual.....	209
Figura 88: Temperatura do ar em escoamento no duto <u>C</u> – ciclo anual.....	210
Figura 89: Erro - curva experimental x curva numérica	211
Figura 90: Perfis de temperatura do solo – dia de verão → identificação dos planos	213
Figura 91: Perfis de temperatura do solo – dia de verão → detalhamento	214
Figura 92: Perfis de temperatura do solo – dia de inverno → identificação dos planos.....	215
Figura 93: Perfis de temperatura do solo – dia de inverno → detalhamento.....	216
Figura 94: Perfis de temperatura do solo não perturbado – dia de verão.....	217
Figura 95: Perfis de temperatura do solo não perturbado – dia de inverno	218

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipo de pesquisa – quanto à natureza	27
Tabela 2: Tipo de pesquisa – quanto aos objetivos	27
Tabela 3: Tipo de pesquisa – quanto aos procedimentos	27
Tabela 4: Índices físicos do perfil de solo estudado, em Viamão	109
Tabela 5: Centro de distribuição de controladores - CDC 1.....	115
Tabela 6: Centro de distribuição de controladores - CDC 2.....	115
Tabela 7: Centro de distribuição de controladores - CDC 3.....	116
Tabela 8: Amplitudes e fases das funções de temperatura no solo.....	132
Tabela 9: Variações de amplitudes e fases nas camadas de solo.....	133
Tabela 10: Velocidades e vazões do ar nos trocadores de calor solo-ar.....	136
Tabela 11: Amplitude e defasagem no tempo das variações $T_{\text{solo}} - T_{\text{ar ext}}$	149
Tabela 12: Propriedades dos componentes construtivos dos dutos enterrados	203
Tabela 13: Condições de contorno de temperaturas para os trocadores de calor solo-ar.....	205
Tabela 14: Condições de contorno para os dutos enterrados – ciclo anual	206
Tabela 15: Condição de contorno na superfície do solo – ciclo anual	217

LISTA DE SÍMBOLOS

Romanos

C	constante
C_s	capacidade térmica volumétrica do solo
C_{ij}	transporte advectivo das tensões de Reynolds
c_p	calor específico
$c_{p,j}$	calor específico da espécie j
c_{s0}	calor específico do solo seco
c_w	calor específico da água
D	número de dias
$D_{L,ij}$	difusão molecular das tensões de Reynolds
E	energia específica
\vec{F}	forças de corpo externas, por unidade de volume
F_{ij}	geração devido à rotação do sistema
\vec{f}	fluxo de calor
G_{ij}	produção das tensões de Reynolds
g	aceleração da gravidade
h	entalpia sensível, profundidade do solo analisada
h_j	entalpia da espécie j
I	tensor unitário
\vec{J}_j	fluxo difusivo da espécie j
j	número do registro de temperatura analisado
k	condutividade térmica
k_s	condutividade térmica do solo

k_t :	condutividade térmica turbulenta
k_{eff} :	condutividade efetiva
\vec{n} :	versor normal
n :	número de registros de temperaturas, no mês
p :	pressão estática
Re :	número de Reynolds
S :	superfície; grau de saturação
S_h :	fonte ou sumidouro de calor
S_m :	massa adicionada ou retirada
S_u :	termo fonte
T :	temperatura
T_m :	temperatura média anual do solo
T_{ref} :	temperatura de referência ($T_{ref} = 298,15K$)
T_0 :	temperatura média
t :	tempo
V :	velocidade do fluido; volume
Y_j :	fração de massa da espécie j
w :	teor de umidade
z :	profundidade

Gregos

α :	difusividade térmica
β :	coeficiente de expansão térmica
γ :	peso específico

ΔT :	variação da temperatura
ε_{ij} :	taxa de dissipação das tensões de Reynolds
Θ_z :	amplitude amortecida
θ_0 :	amplitude
μ :	viscosidade molecular
ρ :	massa específica
ρ_s :	massa específica do solo
$\rho \vec{g}$:	força de corpo gravitacional, por unidade de volume
ν :	viscosidade cinemática
\vec{v} :	vetor velocidade
$\bar{\tau}$:	tensor de tensões viscosas
ϕ_{ij} :	pressão de deformação
ω :	freqüência

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DA PESQUISA

Os avanços na ciência têm proporcionado à humanidade conhecimentos que embasam o desenvolvimento de tecnologias adequadas, não só à melhoria da qualidade de vida, mas à própria sobrevivência dos seres humanos no planeta. A energia é fundamental neste processo e o domínio de tecnologias, que propiciam melhor adequação nas transformações que buscam o aproveitamento das diferentes formas de energia disponíveis na natureza, para suprir as necessidades e exigências mais imediatas das sociedades nos diferentes tempos, tem sido um desafio que acompanha o homem em sua existência.

Assim, seguindo instintos, o homem aproveitou a energia do sol para se aquecer, usou a lenha para alimentar o fogo, tirou proveito da velocidade do vento e das quedas de águas para movimentar máquinas e equipamentos, estabelecendo de forma inata os fundamentos das tecnologias do que hoje denominamos de energia Solar, energia da Biomassa, energia Eólica, energia Hidrelétrica e assim por diante. Com a descoberta dos combustíveis fósseis, no início do século passado, o consumo de energia aumentou e, premido pelo desenvolvimento da economia industrial, o homem aprimorou cada vez mais a tecnologia de buscá-los nas profundezas da Terra; além disso, desenvolveu também a tecnologia das usinas nucleares.

Desde então, seguindo a oferta e a tendência político-econômica mundial, a maior quantidade da energia que a humanidade vem consumindo provém de combustíveis fósseis¹, tais como o carvão, o óleo e o gás natural. Por milhões de anos, as plantas e outros materiais orgânicos têm formado estas substâncias, quando submetidos ao calor e à pressão do subsolo profundo, pelo soterramento entre sucessivas camadas de terra e rocha. O processo de formação dos combustíveis fósseis é contínuo, mas eles estão sendo consumidos muito mais rapidamente do

¹ Da oferta de energia no mundo, no ano de 2006, mais de 80 % se originou de energéticos derivados de combustíveis fósseis. No Brasil este número cai para perto de 50 %, em decorrência da oferta diferenciada de energia de origem hidráulica e biomassa (BRASIL, 2009).

que estão sendo gerados. Por essa razão são considerados não-renováveis; não podem ser recolocados para uso na mesma velocidade com que estão sendo esgotados.

Há que se considerar, também, o impacto ambiental decorrente da exploração, transporte, armazenamento e uso destes produtos, representado, principalmente, pelos riscos de desastres ecológicos, pela emissão de gases poluentes, altamente nocivos à atmosfera, e o desequilíbrio no efeito estufa. Em um tempo que se aproxima, portanto, os combustíveis fósseis não serão mais viáveis, seja do ponto de vista ambiental, ou mesmo do ponto de vista econômico.

Tendo em conta a importância da energia para a existência da nossa sociedade, como a conhecemos, é necessário achar fontes alternativas, que substituam os combustíveis convencionais ou que, no mínimo, atenuem o seu consumo desenfreado e o conseqüente impacto sobre o meio ambiente. O termo fonte alternativa de energia não implica, apenas, numa opção eficiente, mas é sinônimo de energia não poluente, a princípio inesgotável e que possa ser encontrada e explorada de forma universal no planeta.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

O Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra. A radiação solar induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. É a partir da energia do Sol, também, que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a conseqüente geração de eletricidade. Petróleo, carvão e gás natural são gerados a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram da radiação solar a energia necessária ao seu desenvolvimento.

A densidade média do fluxo energético de radiação solar incidente no topo da atmosfera terrestre é de 1367 W/m^2 , quando medida em um plano perpendicular à direção da propagação dos raios solares. Isto determina, anualmente, a incidência de em torno de $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia sobre a superfície da Terra, o que corresponde a mais de 10.000 vezes o consumo mundial de energia no mesmo período. Este fato indica que a radiação solar se constitui em uma fonte energética praticamente inesgotável, havendo um enorme potencial de utilização, por meio de sistemas de captação e conversão, em outras formas de energia.

Mais da metade desta energia, que chega às camadas superiores da atmosfera, seja diretamente ou por difusão, atinge a superfície terrestre. Com uma massa imensa e

propriedades isolantes, relativas ao fluxo térmico, a crosta terrestre funciona como um enorme reservatório inercial para esta energia, com ciclos alternados de armazenamento e fornecimento de calor ao meio ambiente. Considerando o ciclo diário, a superfície terrestre ganha calor durante o dia e perde à noite; da mesma forma, considerando o ciclo anual, a superfície terrestre ganha calor nos períodos quentes e perde nos períodos frios.

A influência sazonal da radiação solar incidente é mais significativa nas camadas superficiais do solo. A temperatura no solo mantém uma média praticamente constante com a profundidade; para uma dada profundidade, no entanto, a amplitude desta variação, além de diminuir exponencialmente com a profundidade, se defasa no tempo com relação à variação na superfície, como decorrência da inércia térmica do solo. Assim, em períodos frios, o subsolo não se mostra tão frio e, em períodos quentes, o subsolo não se mostra tão quente, caracterizando um comportamento mais ameno e mais estabilizado, comparado à variação que ocorre no meio ambiente externo.

Considerando a interface com o solo, as edificações podem estar total ou parcialmente enterradas, ou não enterradas, como na maioria dos casos. Na primeira situação, o contato direto da envoltória da edificação, ou parte dela, com o solo garante ao ar dos ambientes internos maior estabilidade térmica, em relação às variações climáticas externas, possibilitando racionalizar o consumo de energia para se conseguir a condição de conforto nestes espaços. No entanto, alguns problemas podem estar presentes nestes ambientes, como: níveis de iluminação natural insatisfatórios e baixa qualidade do ar. Na segunda situação, que é o caso privilegiado neste estudo, como a edificação não está enterrada, a estratégia para fazer o ar dos ambientes internos se manter com temperatura mais estável, em relação às variações climáticas externas, é fazer este ar circular por dutos enterrados (trocadores de calor solo-ar), em profundidades viáveis técnica e economicamente, para que ele troque calor com o solo, antes de injetá-lo nos ambientes.

Embora existam sistemas de produção, distribuição e uso de energias mais tradicionais e processos plenamente consagrados para condicionamento térmico de ambientes, são promissoras as iniciativas que busquem investir no aprimoramento tecnológico de aproveitamento do subsolo superficial, como armazenador da energia derivada da radiação solar, para a melhoria e racionalização do consumo de energia convencional nas edificações. Sem o ônus da produção e distribuição de energia, o princípio básico para o aproveitamento

implica, tão somente, após a implantação do sistema, na gerência do processo de transferência do calor, do solo para o ar ambiente ou vice-versa.

1.3 OBJETIVOS DO ESTUDO

Este trabalho, abrangendo a área da transferência de calor e da mecânica dos fluidos, teve seu objetivo definido, básica e temporalmente, em dois momentos, seguindo os fatos, desafios e definições que se sucederam no processo de execução.

Em um **primeiro momento**, como decorrência do encantamento pelo trabalho experimental e da possibilidade de desenvolvê-lo junto às instalações do Empreendimento Vila Ventura, localizado em área rural do município de Viamão (RS), parceiro na pesquisa, o estudo se propunha a perseguir dois caminhos na experimentação. O **primeiro**, com a finalidade de avaliar a técnica de dutos enterrados no solo, a partir da circulação do ar ambiente através dos mesmos, aproveitando a inércia térmica do solo, como estratégia para diminuir o consumo de energia convencional, no condicionamento térmico de ambientes construídos e, em particular, em uma edificação construída para o estudo (identificada, na pesquisa, como Casa Ventura). O **segundo** decorreu da existência, próximo ao local previsto para o experimento, de um reservatório de água, com capacidade para aproximadamente duzentos mil litros, que motivou incluir no estudo, como complemento, a avaliação do aproveitamento da inércia térmica desta massa de água, como outra possibilidade de abrandar as condições térmicas do ambiente interior da Casa Ventura, com o auxílio de um *fan-coil* colocado neste ambiente. Na oportunidade, foram previstos monitoramentos de temperaturas e umidades, bem como, o controle de vazões, envolvendo as variáveis de interesse, ou seja, o solo, o ar e a água. Vale registrar, desde já, que o experimento, como um todo, transcorreu durante o ano de 2007 e que, devido a problemas operacionais, a parte da experimentação com a circulação de água nos dutos, aconteceu tão somente entre 8 de janeiro e 4 de fevereiro, sendo descontinuada após esta data.

Diante do exposto, a circulação de ar nos dutos enterrados, e os estudos a esta associados consolidou-se como **um dos objetivos principais** deste trabalho, com o propósito de identificar parâmetros, procedimentos e condições favoráveis, envolvendo o uso desta técnica. Para isto, foram definidos os seguintes **objetivos intermediários**:

- planejar um experimento para fazer o ar ambiente externo circular por dutos enterrados (trocadores de calor solo-ar), antes de ser usado como ar de renovação, do ambiente interno da Casa Ventura;
- conceber a Casa Ventura com dois ambientes centrais, com características dimensionais e de envolvente equivalentes, constituindo os ambientes a serem monitorados no processo, sendo um, na condição natural, referencial, sem renovação de ar, e o outro, com renovação de ar;
- definir a geometria e a configuração dos trocadores de calor solo-ar;
- montar o experimento, incluindo a construção da Casa Ventura, os dutos enterrados e o sistema de monitoramento e aquisição de dados;
- monitorar, além da temperatura do solo e da água, a temperatura e a umidade: do ar externo, do ar nos ambientes internos e do ar em escoamento nos dutos enterrados, bem como a velocidade de seu escoamento nos mesmos;
- montar um banco de dados, para fundamentar as análises atreladas ao objetivo definido.

Motivado por sugestões da banca examinadora, na ocasião do Exame de Qualificação, incluiu-se, entre os objetivos do trabalho, um **segundo objetivo**: comparar os resultados experimentais com valores preditos em simulações numéricas do escoamento do ar, nos trocadores de calor solo-ar do experimento, usando CFD (*Computational Fluid Dynamics*). A partir deste novo objetivo se definiu um novo conjunto de **objetivos intermediários**, a seguir relacionados:

- construir um domínio computacional para possibilitar a simulação numérica, usando o *software* GAMBIT;
- obter valores preditos, através da simulação numérica com o uso do *software* FLUENT, das temperaturas do ar, em escoamento nos trocadores de calor solo-ar e do solo, ao entorno deles;
- apresentar os resultados preditos com o uso do *software* FLUENT.

1.4 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES

Este estudo se caracteriza por ter um objeto complexo, que pode ser simplificado se entendido como composto em três partes, que se integram: o “sistema de ar”, composto pelo solo, dutos enterrados e o ar externo; o “sistema de água”, composto pelo reservatório de água, *fan-coil* e a água; e a Casa Ventura, incluindo seu ar interno. São todos componentes da experimentação, que se interligam, com características próprias e comportamentos temporais específicos, que limitam os resultados obtidos ao tempo, local e condições do estudo experimental realizado.

É preciso destacar que não foi foco na pesquisa analisar o mérito dos fenômenos que envolveram a transferência de calor e a mecânica dos fluidos no estudo, mas apenas avaliar seus resultados, em termos do monitoramento e análise das temperaturas, do ar (externo e interno) e da água, e suas variações, e das velocidades nos escoamentos, também, do ar e da água.

Como expresse acima, e ajudando a delimitar o estudo, vale salientar que este se baseou no monitoramento de variáveis, que eram fortemente dependentes das variações climáticas do local, as quais, por sua vez, dependiam de várias outras variáveis independentes, **não controladas na pesquisa**, como, por exemplo: a variação de umidade no solo, em períodos de chuva intensa; eventuais sombreamentos parciais da superfície do solo; o próprio tipo de cobertura do solo (vegetado ou não vegetado) e a influência da incidência de radiação solar na envolvente da Casa Ventura. Por isso, prevaleceu a proposta inicial, de desenvolver um trabalho mais informativo, focado na identificação de parâmetros, procedimentos e condições favoráveis, envolvendo o aproveitamento da inércia térmica do solo e de massas de água, com a finalidade de abrandar as condições térmicas do ar em ambientes construídos.

Por outro lado, exatamente por representarem o comportamento característico do experimento, os resultados experimentais foram usados como *input* para a simulação computacional, buscando validar uma metodologia de análise da eficácia dos trocadores de calor solo-ar.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este texto se caracteriza por descrever, de forma detalhada, as atividades desenvolvidas e as análises realizadas no processo da pesquisa, com a intenção de alcançar seus objetivos. Para isso, foi estruturado como se apresenta a seguir, de forma organizada a fundamentar a leitura e facilitar sua compreensão. Este capítulo 1 faz uma introdução ao estudo. Aborda, inicialmente, o contexto da pesquisa, no qual identifica os pressupostos que a justifica. Segue, com o problema de pesquisa, no qual expõe sua motivação. Continua, com os objetivos da pesquisa, definindo os dois enfoques para o estudo: o experimental e o computacional numérico. Por fim, esclarece sobre as delimitações e limitações do estudo. O capítulo 2 apresenta a metodologia da pesquisa, sua estratégia e delineamento. O capítulo 3 trata da revisão de literatura, que respalda a pesquisa. A revisão se estrutura em três partes: na primeira, apresenta referências que versam sobre o comportamento térmico do solo e trocadores de calor solo-ar, incluindo abordagens experimentais e/ou numéricas; na segunda, descreve o regime térmico do solo, passando pela equação do calor na sua forma mais geral, para então analisar a teoria da difusão do calor no solo; e, na terceira, trata da fundamentação teórica envolvida na modelagem computacional do problema em estudo. O capítulo 4 faz uma exposição detalhada do sistema experimental, em ambiente de campo, que foi construído para a realização da pesquisa. Apresenta e descreve fisicamente o experimento e o processo de montagem, incluindo o sistema de instrumentos e aquisição de dados. Então, no capítulo 5, estes resultados experimentais são apresentados e analisados. O capítulo 6 trata da simulação numérica dos trocadores de calor solo-ar, apresentando seus resultados e comparando-os aos correspondentes resultados experimentais. No capítulo 7 são feitas as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido, incluindo as sugestões para trabalhos futuros. Finalmente, as referências bibliográficas empregadas na elaboração desta pesquisa são apresentadas.

2 METODOLOGIA DE PESQUISA

2.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Jung (2004), abordando a metodologia científica com ênfase em pesquisa tecnológica, expressa que a “ciência apresenta uma diferenciação em relação a forma investigativa” e preconiza, em função disto, que se deva entender desde sua natureza o que se pretende fazer. O autor apresenta opções para escolha do tipo de pesquisa, conhecendo-se sua natureza, objetivos e procedimentos. A figura 1 esquematiza esta classificação, na aplicação às áreas tecnológicas, e as tabelas 1, 2 e 3 descrevem seus aspectos relevantes e metas.

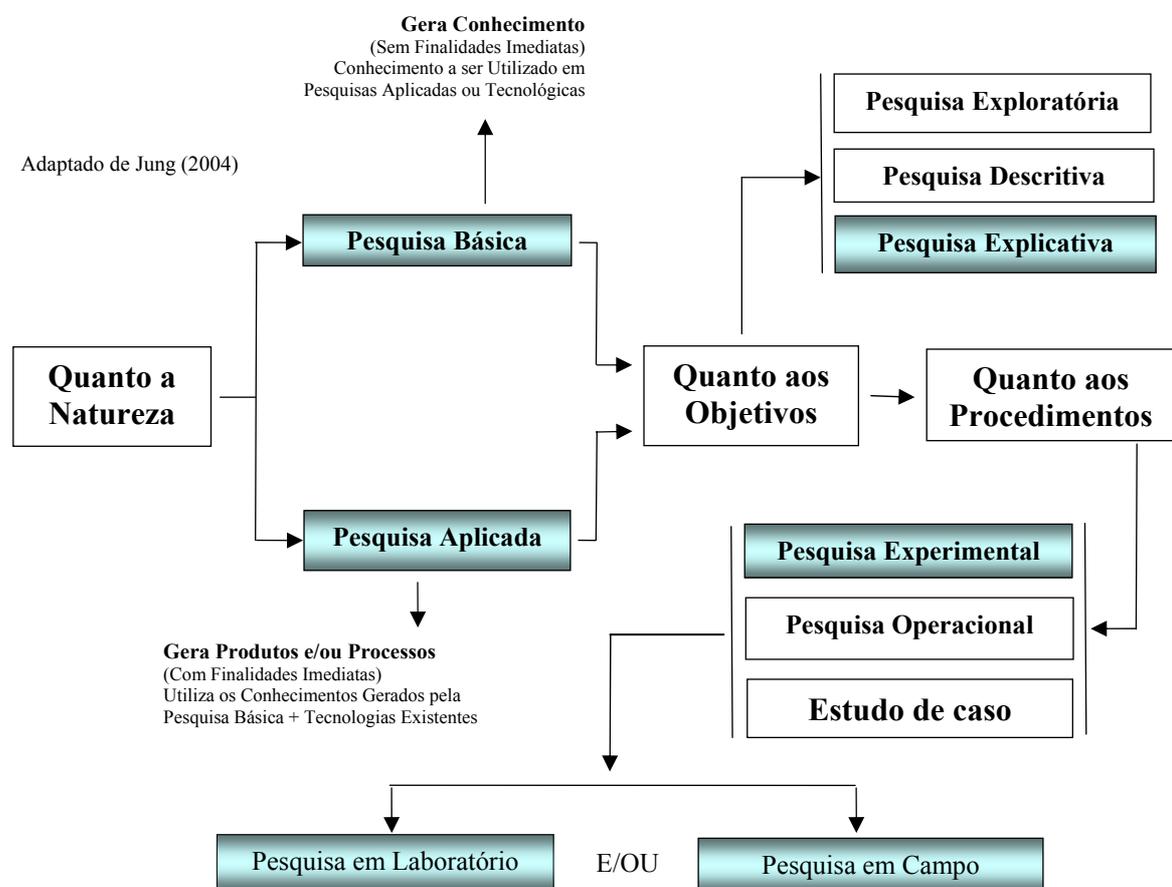


Figura 1: Tipos de pesquisa

Tabela 1: Tipo de pesquisa – quanto à natureza

Tipo de Pesquisa Quanto à Natureza	Aspectos relevantes	Metas
Pesquisa Básica	Objetiva entender, descrever ou explicar os fenômenos naturais. Objetiva divulgar o conhecimento obtido. Produzir artigos científicos.	Conhecer fenômenos naturais. Obter uma explicação ou descrição. Produzir conhecimento destinado a aplicações intelectuais e/ou materiais.
Pesquisa Aplicada	Objetiva a aplicação do conhecimento básico. Gera novas tecnologias e conhecimentos resultantes do processo de pesquisa. Produz produtos, processos e patentes.	Otimizar produtos ou processos. Obter marcas ou patentes. Produzir produtos ou processos mais competitivos.

Tabela 2: Tipo de pesquisa – quanto aos objetivos

Tipo de Pesquisa Quanto aos Objetivos	Aspectos relevantes	Metas
Pesquisa Exploratória	Origina novos produtos e processos por impulsos criativos. Produzem invenções ou inovações	Descobrir, achar, elucidar fenômenos, ou, explicar aqueles que não eram aceitos apesar de evidentes.
Pesquisa Descritiva	Observa, registra e analisa os fenômenos ou sistemas técnicos, sem, entretanto, entrar no mérito dos conteúdos.	Identificar, registrar e analisar as características, fatores ou variáveis que se relacionam com o fenômeno ou processo.
Pesquisa Explicativa	Explica o “porquê das coisas”. Nas áreas tecnológicas, os métodos experimentais de modelagem e simulação identificam os fenômenos, para que possam, posteriormente, serem explicados.	Ampliar generalizações, definir leis mais amplas, estruturar e definir modelos teóricos, relacionar hipóteses, em uma visão mais unitária do universo ou âmbito produtivo, em geral, e gerar hipóteses ou idéias por força de dedução lógica.

Tabela 3: Tipo de pesquisa – quanto aos procedimentos

Tipo de Pesquisa Quanto aos Procedimentos	Aspectos relevantes	Metas
Pesquisa Experimental	Requer uma detalhada, sistemática e imparcial manipulação de variáveis e coleta de dados sobre o fenômeno de interesse. Nas áreas tecnológicas, a experimentação científica é o procedimento mais utilizado para a produção de tecnologia, sendo que as inovações são originadas, principalmente, a partir de ensaios e estudos em laboratório.	Viabilizar a descoberta de novos materiais, componentes, métodos, técnicas, etc... Obter novos conhecimentos, a partir de elementos atômicos e, também, obter produtos (protótipos) de alta complexidade tecnológica.
Pesquisa Operacional “ <i>operations research</i> ”	Investiga, de forma sistemática e racional, os processos envolvidos na realização de uma atividade produtiva, com a finalidade de orientar a melhor opção para a tomada de decisões.	Tratar, através do uso de ferramentas estatísticas e métodos matemáticos, da otimização para a seleção do meio mais adequado para se obter o melhor resultado.
Estudo de Caso	Tem por finalidade entender “como” e “por que” funcionam as “coisas”.	Investigar um fenômeno dentro do contexto local, real e especial, quando os limites entre fenômeno e o contexto não estão claramente definidos.

A presente pesquisa compreende as áreas de transferência de calor e de mecânica dos fluidos e tem como objeto os sistemas formados pelo solo e dutos enterrados para circular ar

ambiente (trocadores de calor solo-ar), para diminuir o consumo de energias convencionais no aquecimento e resfriamento de ambientes construídos. No seu desenvolvimento, a partir de uma extensa revisão de literatura, envolveu métodos analíticos, experimentais (em ambiente de campo) e numéricos computacionais, com a premissa científica de o solo ter potencial para, nos períodos frios, aquecer, ou, nos períodos quentes, resfriar o ar ambiente circulado pelos dutos.

Seguindo a referência acima, quanto à natureza, o presente estudo é uma pesquisa **básica e aplicada**, que Jung (2004) define como uma forma associativa de pesquisa. **Básica**, porque descreve fenômenos naturais, como a variação de temperatura e umidade do ar ambiente e do solo, e **aplicada**, por objetivar a utilização de tais descrições para aplicações práticas, com a explicitação de parâmetros, procedimentos e condições favoráveis para o solo aquecer ou resfriar o ar ambiente.

Quanto aos objetivos, é uma pesquisa **explicativa**, porque visa identificar os fatores que contribuem para a ocorrência dos fenômenos ou variáveis que afetam o processo, como a aquecimento ou o resfriamento do ar circulante nos dutos enterrados.

Por fim, quanto aos procedimentos, é uma pesquisa **experimental**, em ambiente de campo (experimento) e em ambiente de laboratório computacional (simulação numérica), porque viabiliza a explicação do funcionamento físico e a descrição matemática dos processos, ou seja, viabiliza a validação dos sistemas formados pelo solo e dutos enterrados para circular ar ambiente (trocadores de calor solo-ar) e contribuir na diminuição do consumo de energias convencionais, no aquecimento e resfriamento de ambientes construídos.

2.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O delineamento de uma pesquisa refere-se, conforme Gil (2009), ao planejamento da mesma, em sua dimensão mais ampla, ou seja, envolve os meios técnicos da investigação, seus instrumentos e procedimentos. Nesta pesquisa, estas informações, pela quantidade e dependência entre elas, foram sendo minuciosamente descritas e relacionadas ao longo do texto. A figura 2 representa, esquematicamente, o delineamento da pesquisa, que na sequência, para direcionamento da leitura da tese e compreensão *a priori* do que foi feito, é comentado em seus aspectos gerais.

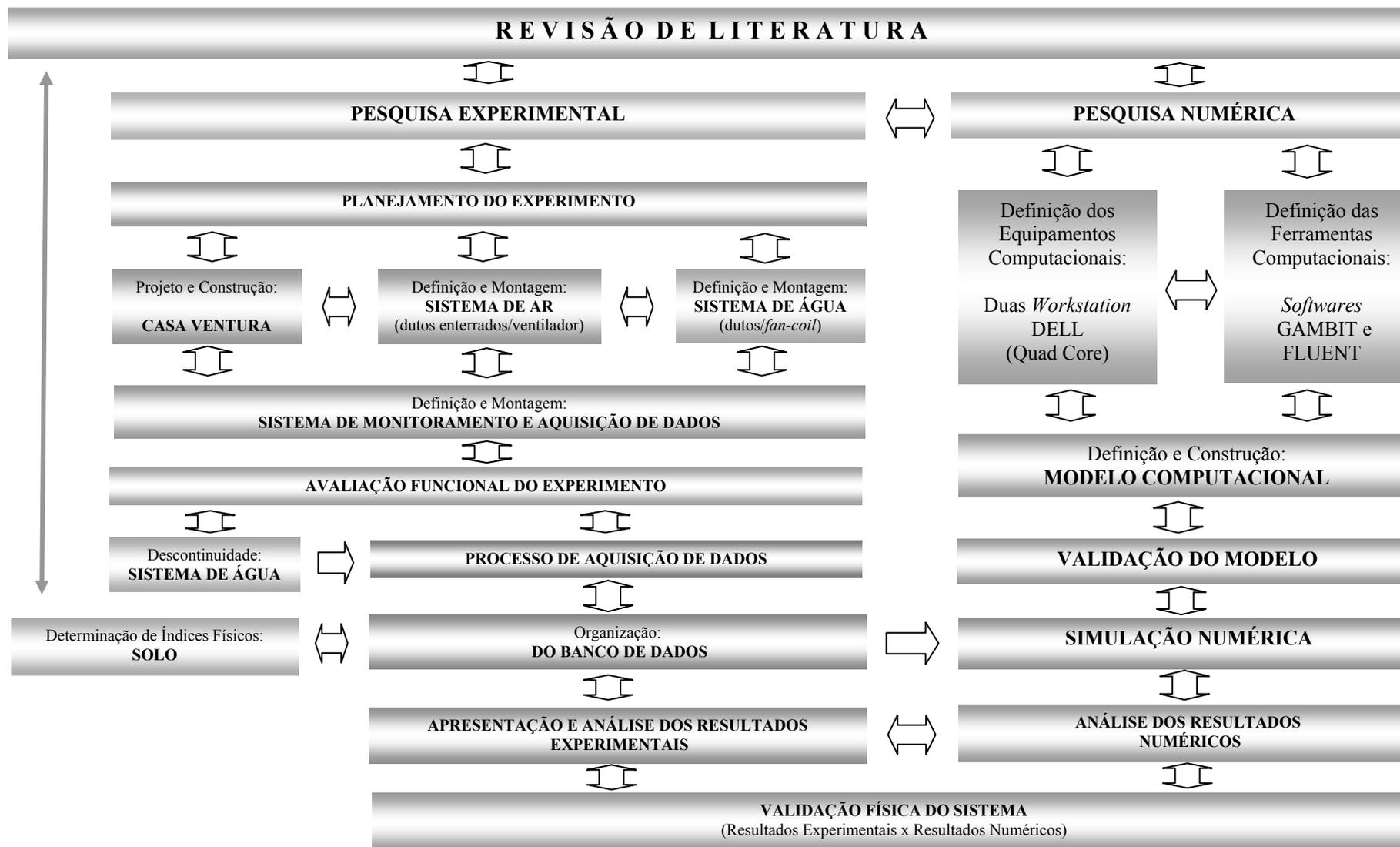


Figura 2: Delineamento da pesquisa

2.2.1 Revisão de literatura

A revisão de literatura foi constante no processo da pesquisa e o seu propósito foi elucidar os aspectos teóricos e práticos necessários ao tema de pesquisa: o uso do solo como reservatório de energia, na troca de calor com o ar ambiente, circulado por dutos enterrados (trocadores de calor solo-ar). No início do estudo, para permitir o planejamento da fase experimental, o foco da revisão foi o de publicações que elucidassem os aspectos geométricos, de configuração e de funcionamento dos trocadores de calor solo-ar. Logo a seguir, o processo se estendeu a publicações sobre o comportamento térmico do solo e demais aspectos de projeto e uso de trocadores de calor solo-ar, que contribuíssem para a meta de identificar parâmetros, procedimentos e condições favoráveis, envolvendo o uso de trocadores de calor solo-ar. A partir do exame de qualificação, quando da inclusão, na pesquisa, da análise computacional do escoamento do ar no trocador de calor solo-ar, buscou-se na literatura publicações recentes envolvendo a Dinâmica dos Fluídos Computacional – CFD e a simulação numérica de trocadores de calor solo-ar, em especial aquelas realizadas com apoio dos *softwares* GAMBIT e FLUENT, que fundamentassem a abordagem computacional e a consequente validação física do processo, envolvendo o uso dos trocadores de calor solo-ar. Em seus documentos e informações consideradas mais relevantes, a revisão de literatura está apresentada, no capítulo 3.

2.2.2 Pesquisa experimental

Para viabilizar a etapa experimental da pesquisa, foi estabelecida uma parceria envolvendo o Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação – NORIE, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, e o Empreendimento Vila Ventura, do Grupo SAMPAR Agropecuária Ltda, com sede e instalações no município de Viamão, na grande Porto Alegre, local onde foi montado o experimento.

Este empreendimento segue uma filosofia ecologicamente sustentável, privilegiando, entre outras ações, a edificação de seus prédios e instalações com materiais e equipamentos existentes e disponíveis na região, reaproveitados ou reciclados. Um grande estoque destes materiais e equipamentos foi disponibilizado para seleção e uso na pesquisa; foi colocada à disposição da pesquisa, também, a mão de obra especializada para execução dos serviços, na área da construção civil, necessários à implantação do experimento.

As obras civis e serviços necessários à montagem da etapa experimental estão descritos em suas características, detalhes e sequência no capítulo 4, mais especificamente nos subcapítulos 4.2, 4.3 e 4.4. Em termos gerais, foram as obras e serviços que se relacionam a seguir:

- construção de uma edificação, como antes referido nos objetivos, denominada Casa Ventura. O projeto construtivo correspondente foi desenvolvido dentro do processo da pesquisa. A Casa Ventura foi planejada com quatro ambientes, dois ambientes centrais, com características dimensionais e de envolvente equivalentes, constituindo os ambientes monitorados no processo, sendo um na condição natural (ambiente B), referencial, sem renovação de ar; e o outro, com renovação de ar (ambiente A). Os outros dois ambientes, laterais, foram auxiliares na pesquisa;
- escavações e colocação de dutos no solo (enterrados), interligando o ambiente externo ao interior da Casa Ventura (trocadores de calor solo-ar²). Foram instalados três dutos de PVC, dois na profundidade de 1,60 m (dutos A e B)³, afastados de 0,60 m, e um duto a 0,50 m de profundidade (duto C). Os dutos A e C foram previstos para levar ar de renovação ao ambiente A e o duto B, ao ambiente B, quando do uso da edificação. Durante a experimentação, entretanto, o ambiente A recebeu ar somente do duto A e o ambiente B não recebeu ar de renovação. O ar circulante no duto B e o ar circulante no duto C não foram aproveitados como ar de renovação durante o experimento. Os escoamentos nestes dutos foram mantidos para monitoramento de suas características. Um único ventilador insuflou o ar externo nos dutos. Neste caso, de escoamento de ar nos dutos enterrados, a premissa foi o solo funcionar como um reservatório de energia na troca de calor com o ar ambiente;
- montagem da rede de circulação de água, interligando o reservatório⁴ de água ao *fan-coil* colocado no interior do ambiente A, para avaliação, complementar no estudo, do aproveitamento da inércia térmica desta massa de água para ajudar a abrandar as condições térmicas no ambiente interno. Neste caso, de escoamento de água por dutos,

² Os trocadores de calor não foram dimensionados. Foram montados com canos de PVC reaproveitados, obtidos do estoque do Empreendimento Vila Ventura.

³ Destaca-se que, no planejamento do experimento, os dutos A e B foram previstos na profundidade de 2,0 m e que, devido a limitações na execução das escavações, ficaram posicionados na profundidade de 1,60 m.

⁴ Conforme referido nos objetivos da pesquisa, este reservatório de água, localizado próximo ao local da pesquisa, tinha capacidade para aproximadamente duzentos mil litros.

ainda que estes tenham ficado enterrados, a premissa foi de que o solo funcionaria apenas como um protetor à radiação solar, para preservar as características térmicas da água, desde o reservatório, de onde a mesma era bombeada, até o interior da casa. Isto porque os dutos usados para escoamento da água eram de material com baixa condutividade térmica;

- execução de duas tubulações auxiliares na experimentação: uma para passagem da rede elétrica, de alimentação dos equipamentos; outra, para da rede de dados.

A infra-estrutura acima ficou disponível à pesquisa em meados de abril de 2006. Nos meses de maio e junho de 2006 foi montado o sistema de monitoramento e aquisição de dados na pesquisa, cuja descrição detalhada, também, está no capítulo 4. Os sub-capítulos 4.6, 4.7 e 4.8 abordam a instalação dos sensores e do sistema de aquisição e gerenciamento de dados de temperatura e umidade, da medição de velocidades do ar nos dutos enterrados e da vazão de água no sistema, respectivamente.

Contribuiu para viabilizar esta etapa, no assessoramento à montagem, a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS, através do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Termofluidodinâmica Aplicada – LEPTA, da Faculdade de Engenharia – FENG.

Das decisões e detalhes desta etapa se destacam:

- foi decidido usar sensores e controladores comerciais para as medições de dados de temperatura e umidade na experimentação, tendo em vista a proposta inicial de identificar parâmetros, procedimentos e condições favoráveis, envolvendo o uso de trocadores de calor solo-ar. A premissa foi manter a conformidade com eventuais aplicações práticas decorrentes do estudo, as quais, certamente, usaram este tipo de equipamento;
- com a decisão acima, foram usados sensores e controladores da empresa *Full Gauge Controls*, para aquisição dos dados de temperatura e umidade, bem como foi usado o *software* Sitrad⁵, disponibilizado pela empresa, para gerenciamento dos dados. Foram monitorados o ar ambiente externo, o solo, o ar em escoamento nos dutos enterrados, os ambientes internos e a água em circulação no *fan-coil* e no reservatório, conforme procedimentos e estratégias extensivamente detalhadas nos itens do sub-capítulo 4.6;

⁵ Este *software* permitiu o acompanhamento remoto, em tempo real, do processo de medições e registro dos dados.

- para a avaliação da velocidade do ar em escoamento nos dutos foi usado um anemômetro de fio quente, conforme procedimentos descritos no sub-capítulo 4.7;
- para monitoramento da vazão de água em circulação no *fan-coil* foi usado um rotâmetro de linha, conforme descrito no sub-capítulo 4.8;

Após alguns testes, avaliações localizadas e ajustes nos equipamentos, no início de julho de 2006 o experimento foi colocado para funcionar como um todo. O sistema Sitrad funcionou como esperado, permitindo o acompanhamento e registro dos dados de temperatura e umidade. A cada meia hora o sistema passou a registrar os dados correspondentes aos sensores ativos no experimento.

Com o passar dos dias foi possível avaliar a consistência dos dados, das distribuições de temperatura e umidade. Foram feitas, também, sucessivas medições da velocidade do ar nos dutos enterrados, com o ar escoando somente no duto A, no duto A e B e nos três dutos simultaneamente. Foi alterada a vazão da água no *fan-coil*. No entanto, devido a problemas de operação por parte do Empreendimento Vila Ventura, observou-se que, com frequência, o reservatório se mantinha com nível baixo de água, insuficiente para uso na experimentação. Algumas decisões foram tomadas:

- durante o período de experimentação o ar do ventilador seria insuflado permanentemente nos três dutos. Isto porque, nesta condição, a velocidade do ar no duto A se mostrou adequada para renovar o ar do ambiente A, na razão aproximada de uma vez e meia seu volume por hora, ou seja, uma renovação equivalente a uma ventilação natural do ambiente;
- a vazão de água no *fan-coil* seria mantida em torno de 10 litros por segundo, que nas avaliações se mostrou adequada para permitir a troca de calor entre a água circulante pela serpentina do equipamento e o ar do ambiente A, renovado e circulado pela parte externa desta serpentina;
- o ventilador do *fan-coil* seria mantido funcionando sempre, mesmo que o sistema de água não estivesse ativo. Isto para homogeneizar a mistura do ar no ambiente A, renovado com ar proveniente do duto A;

Após um período de normalidade, ao final de setembro de 2006, alguns controladores do sistema Sitrad apresentaram defeito e foram substituídos. Isto ocorreu após um período de chuvas intensas, acompanhadas de descargas elétricas. O problema foi recorrente, o que levou a reestruturação completa da rede de dados, com ênfase na proteção frente às descargas elétricas. Os equipamentos de informática e de proteção foram substituídos. Os sensores, controladores e interface do sistema Sitrad foram retirados, para recuperação e aferição pelo departamento técnico da empresa *Full Gauge Controls*.

Em meados do mês de dezembro de 2006 o experimento ficou novamente em condições de ser acionado. Testes e ajustes foram feitos e os dados começaram a ser registrados antes do final deste mês. A data de 01 de janeiro de 2007 foi admitida como inicial, para formação do banco de dados da pesquisa.

Destaca-se que o reservatório de água, como antes mencionado, esteve abastecido e em condições de ser usado na pesquisa entre 8 de janeiro e 4 de fevereiro de 2007. Desta forma, o banco de dados tem registros referentes ao sistema de água somente neste período.

Afora pequenos problemas localizados o experimento se manteve em funcionamento, normalmente, até maio do ano de 2008. Para a pesquisa, a data de 31 de dezembro de 2007 foi admitida como final, para o banco de dados da pesquisa.

2.2.3 Índices físicos do solo

Paralelamente ao andamento do experimento, foram retiradas amostras do solo, no local da pesquisa, para determinação de índices físicos, para compor o banco de dados da pesquisa, visando possibilitar as análises, conforme detalhado no item 4.5.

2.2.4 Apresentação e análise dos resultados experimentais

Os resultados experimentais foram apresentados e analisados, usando-se a técnica de organizá-los em tabelas e/ou a técnica de expressá-los visualmente, através de gráficos, de forma a facilitar a compressão dos mesmos. A seguir, são feitos destaques pontuais, como forma de ilustrar a estratégia adotada na apresentação e análise destes resultados, que está detalhada no capítulo 5.

- seguindo a natureza básica do estudo, as variações temporais relativas aos fenômenos naturais, como a temperatura do ar externo e as temperaturas do solo, foram apresentadas

diretamente em gráficos de dispersão de duas variáveis (temperatura x tempo). Para cada caso foi apresentada a variação temporal anual e exemplos de variações temporais diárias;

- seguindo o mesmo procedimento acima, foram apresentadas as variáveis aplicadas à pesquisa, como as temperaturas do ar em escoamento nos dutos enterrados, as temperaturas dos ambientes internos e a variação de temperatura prevista para o solo, no local da pesquisa;
- em alguns casos, com a finalidade de complementar as comparações e análises, foram incluídas nos gráficos, curvas ajustadas aos dados, obtidas a partir do uso de modelos de regressão não linear (senoidais);
- as variações temporais da temperatura do solo foram comparadas com as variações temporais do ar externo, gerando valores médios mensais, correspondentes ao potencial do solo em aquecer ou resfriar o ar externo. Estas diferenças foram apresentadas em gráficos de colunas agrupadas, uma correspondente ao potencial de aquecimento, outra ao potencial de resfriamento;
- este mesmo procedimento acima foi usado para comparar as variações temporais das temperaturas do ar, em escoamento ao longo do comprimento dos trocadores de calor solo-ar.

2.2.5 Pesquisa numérica

A proposta de analisar computacionalmente o escoamento do ar nos trocadores de calor solo-ar, do experimento, como antes referido, incluiu-se na pesquisa quando do Exame de Qualificação e direcionou o estudo para a área da Dinâmica dos Fluidos Computacional – CFD. Além de retomada a revisão de literatura antes referida, foi necessário viabilizar a estrutura física computacional para o estudo, bem como definir os procedimentos, incluindo a escolha dos aplicativos CFD comerciais a serem utilizados.

Contribuiu para viabilizar esta etapa, disponibilizando duas estações de trabalho (DELL – Precision – Quad Core), os aplicativos e no assessoramento ao uso dos métodos computacionais, a Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG, através do Laboratório de Modelagem Computacional, da Escola de Engenharia – EE.

Algumas decisões se estabeleceram a partir da parceria referida acima, direcionando a definição dos procedimentos a serem seguidos:

- para a análise numérica seriam usados os *softwares* GAMBIT e FLUENT, disponíveis no Laboratório;
- os equipamentos ficariam de uso exclusivos para a pesquisa;
- um bolsista recém-doutor seria responsável pelo assessoramento ao uso dos aplicativos.

Os trabalhos se iniciaram ao final do ano de 2008, com o foco no aprendizado do uso dos *softwares*. Com o GAMBIT, um *software* de pré-processamento, foi construído o domínio computacional (incluindo o solo e os três dutos enterrados) e gerada a malha para a análise CFD.

Os desníveis na superfície do solo, cortes nos taludes para posicionar a Casa Ventura e os traçados dos dutos, dificultaram reproduzir computacionalmente o que se construiu no experimento. Isto foi superado por sucessivas avaliações e correções no modelo em construção.

A cada mudança no domínio era gerada a malha correspondente. A qualidade da malha, indicada pelo próprio *software*, também foi um parâmetro para as correções e adequações feitas no domínio computacional.

Em ato contínuo, a cada malha gerada, esta era exportada para o FLUENT, para completar a etapa de pré-processamento, com as informações referentes aos materiais usados, abrangência da análise e condições de contorno, e realização da etapa de processamento (simulação numérica), a partir da informação das condições iniciais (problema transiente). Por fim, na etapa de pós-processamento, o FLUENT disponibilizava os resultados.

A análise dos resultados foi outro parâmetro para avaliação continuada do processo, desde o domínio computacional, até as informações fornecidas ao *software*.

A malha usada nas simulações, atendendo aos critérios de independência de malha com a precisão de 10^{-3} , ficou disponível para realização das simulações finais em maio de 2009. O sub-capítulo 6.1 apresenta o domínio computacional e a malha usada no estudo, bem como documenta o processo descrito acima, em seus aspectos mais importantes.

As simulações numéricas do escoamento do ar nos dutos enterrados foram realizadas entre junho e setembro de 2009. As simulações foram realizadas tendo como referência o ciclo anual da variação temporal de temperatura das variáveis e estão detalhadas no capítulo 6.2.

2.2.6 Resultados experimentais x resultados numéricos

No processo de apresentação dos resultados experimentais e comparação deles com os resultados experimentais correspondentes, recorreu-se, novamente, à técnica de expressar os resultados visualmente, através de gráficos. Isto, para facilitar a imediata percepção da concordância entre os mesmos.

Foram usados gráficos de dispersão de duas variáveis (temperatura x tempo). Para cada caso analisado, o gráfico apresentou três curvas: uma correspondente ao resultado experimental; outra, ao resultado numérico; e a terceira, correspondente ao erro percentual entre os resultados, tendo por referência o resultado experimental.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo, de revisão de literatura, busca elucidar o tema de pesquisa: o uso do solo como reservatório de energia na troca de calor com o ar ambiente circulado por dutos enterrados (trocadores de calor solo-ar). Tendo a finalidade de oferecer um respaldo teórico para melhor entender o contexto em que a pesquisa foi realizada, incluindo seus objetivos, a etapa de experimentação e a abordagem computacional realizada, o capítulo se desenvolve em três sub-capítulos: comportamento térmico do solo e trocadores de calor solo-ar; regime térmico do solo; e fundamentos da abordagem computacional.

3.1 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO E TROCADORES DE CALOR SOLO-AR

Neste item, a revisão bibliográfica abrange trabalhos que abordam o comportamento térmico do solo, enquanto reservatório inercial de energia proveniente da radiação solar e, também, trabalhos que, baseados nesta inércia, usando métodos analíticos, métodos experimentais e/ou de métodos numéricos computacionais, abordam a técnica de usar dutos enterrados, como elementos do trocador de calor solo-ar, buscando aquecer ou resfriar o ar e, assim, contribuir para minimizar o uso das energias convencionais nas edificações.

A percepção científica que, em períodos frios, o subsolo não se mostra com temperaturas tão baixas (frio) e, em períodos quentes, o subsolo não se mostra com temperaturas tão altas (quente), ou seja, que o comportamento térmico do solo é mais ameno e estabilizado, se comparado com a variação climática que ocorre no ambiente externo, tem sido uma alternativa para o pré-aquecimento de ambientes, no inverno, e para o resfriamento de ambientes, no verão. Para isto, duas estratégias têm sido usadas: o **contato direto** da edificação com o solo, o qual envolve o posicionamento da edificação de forma tal que sua envoltória fique em contato total ou parcial com o solo, para trocar calor; e o **contato indireto**, o qual envolve o uso de **trocadores de calor solo-ar**, que são sistemas constituídos

por dutos enterrados, através dos quais o ar do ambiente é circulado, com auxílio de ventiladores, para trocar calor com o solo. Nos períodos quentes, a troca é no sentido de resfriar o ar ambiente, com o solo absorvendo calor do ar circulante e, nos períodos frios, é no sentido de aquecer o ar ambiente, com o solo cedendo calor. O ar circulado no trocador de calor solo-ar pode ser o ar externo, neste caso, com a finalidade de renovação do ar interno aos ambientes.

As edificações em contato direto com o solo, normalmente, apresentam baixo custo de manutenção e operação, decorrente de características intrínsecas, como limitadas infiltrações e perdas de calor, boa proteção à radiação solar direta e ao calor externo, boa redução aos níveis de ruído e vibrações, excelente proteção ao vento e tempestades e condições de segurança diferenciadas. Entretanto, podem apresentar, em contrapartida, problemas de condensação interna, baixa resposta às trocas climáticas, baixos níveis de iluminação natural e baixa qualidade do ar (MIHALAKAKOU; SANTAMOURIS; ASIMAKOPOULOS, 1992).

Esta técnica tem sido usada em diferentes tempos da história e em diferentes partes do mundo. Como exemplo, pode-se citar que os Vikings, povo proveniente da península Escandinava, que se espalhou pela a Europa no fim da Antiguidade e início da Idade Média, e que construía suas casas parciais ou totalmente enterradas, usando muita madeira e um telhado recoberto de turfa, um tipo de grama, como forma de manter os ambientes mais aquecidos e para se protegerem do frio intenso das regiões que habitavam, aproveitando a energia decorrente da radiação solar, que se acumula, nos períodos quentes, na superfície terrestre (FIGUEIREDO, 2004).

O conceito e as referências ao uso de dutos enterrados, acoplados a edificações, podem ser rastreados por vários séculos atrás. Por exemplo, em 1550, iniciou-se em Costozza, um subúrbio de Longare, dez quilômetros ao sul de Vicenza, no norte da Itália, a construção de um complexo residencial, conhecido como *Le ville di Costozza*. Eram seis imponentes edificações com fins residenciais, todas dotadas de um sistema natural de resfriamento ambiental. Ao longo dos séculos seguintes o conjunto foi bastante modificado, mas o sistema de resfriamento dos ambientes foi preservado. Grandes cavidades internas na rocha (*covoli*), em parte naturais e em parte artificiais, feitas pelo homem, existentes nas colinas de Berici, foram interligadas por dutos (*ventidotti*) ao subsolo das edificações. A temperatura do ar no interior das cavidades se mantém praticamente constante, durante todo o ano, em torno de 11 a 12 °C. As cavidades se comunicam com o exterior em diferentes alturas, ao longo das

encostas das colinas. Quando a temperatura do ar exterior é alta, o ar quente entra por estas aberturas superiores, esfria e, por diferença de massa específica, desce, empurrando o ar fresco das cavidades ao subsolo das edificações, onde dutos estrategicamente colocados distribuem o ar para os diversos ambientes. Este sistema de resfriamento foi famoso em seu tempo e referência para o aproveitamento da inércia térmica do solo, como estratégia para o condicionamento da temperatura de ambientes construídos (ENEA, 1983).

Mais recentemente, o uso do solo, como armazenador de calor para o condicionamento térmico de ambientes construídos, tem sido proposto e discutido por vários autores. As publicações focam, basicamente, a modelagem do fenômeno de transferência de calor, que se estabelece entre o ar, o duto e o solo, buscando a melhor eficiência para o sistema. Aspectos como as características e propriedades térmicas do solo, o perfil de temperaturas no solo, o ciclo diário de temperaturas, o ciclo anual de temperaturas, a velocidade do escoamento do ar nos dutos, o diâmetro e comprimento dos dutos, a profundidade dos dutos no solo, o tipo de cobertura sobre o solo, a variação de umidade do ar nos dutos e no solo, a interferência do processo de transmissão de calor no solo ao redor de dutos próximos, o afastamento necessário entre dutos, considerando a influência do ciclo diário e do ciclo anual de temperaturas, entre outros aspectos, têm sido analisados à exaustão em inúmeros trabalhos de pesquisa.

3.1.1 Comportamento térmico do solo

As variações diárias e anuais das distribuições de temperaturas no solo foram analisadas por Bharadwaj e Bansal (1981). Os autores consideram nas análises várias combinações de condições de insolação e umidade na superfície do solo: superfície seca e ensolarada; superfície úmida e ensolarada; superfície sombreada e seca; e superfície sombreada e úmida. Um modelo numérico foi usado para simular, a partir de registros meteorológicos da região de Nova Deli, no ano de 1974, a variação diária da temperatura no solo, para um dia de temperatura elevada, típico de verão, e para um dia de temperatura baixa, típico de inverno, bem como a variação anual da temperatura do solo, para cada combinação de condições em sua superfície. Decorrente do ciclo diário de energia solar, a temperatura do solo se mostrou variando até a profundidade de 0,15 m, enquanto, para o ciclo anual, a temperatura se mostrou variando até a profundidade de 4 m.

A partir de resultados experimentais anteriores, obtidos de estudos de outros pesquisadores, os

quais relacionam os perfis de temperaturas que se estabelecem na superfície do solo e no subsolo, em decorrência da radiação solar, Givoni e Katz (1985) resumiram e analisaram os dados para derivar generalizações. O solo foi admitido como um sólido semi-infinito tendo, na superfície plana, temperatura uniforme. Dois modelos matemáticos são descritos para a variação da temperatura no maciço: o primeiro modelo supõe a temperatura na superfície do solo conhecida e esta variação temporal é considerada como condição de contorno na superfície plana do problema. A variação de temperatura, na superfície do solo, é considerada igual à variação de temperatura registrada para a profundidade de 0,05 m, no solo; o segundo modelo considera o caso da temperatura na superfície do solo ser desconhecida e usa dados meteorológicos para estabelecer a condição de contorno do problema, a partir do balanço de energia na superfície. Ambos os modelos desconsideram o ciclo diário de variação da temperatura na superfície do solo e, a partir do ciclo anual, mostram a variação da temperatura no solo, com amplitude diminuindo exponencialmente com a profundidade e se defasando no tempo, em relação ao que acontece na superfície. A amplitude da variação da temperatura no solo foi relacionada com a amplitude de variação da temperatura na superfície, para diferentes tipos de solo, e as análises mostraram esta relação variando, dentro de limites estreitos, sugerindo uma classificação dos solos em função do tipo de clima. A difusividade térmica do solo mostrou variação entre os limites de $0,095 \text{ m}^2/\text{dia}$, para solos úmidos, e de $0,034 \text{ m}^2/\text{dia}$, para solos secos. A defasagem, no tempo, da onda de temperatura anual no solo, com a profundidade, foi determinada como tendo um valor médio de 22 dias/m.

Com o objetivo de determinar o desempenho térmico de construções em contato direto com o solo, bem como determinar a eficiência de trocadores de calor solo-ar (dutos enterrados), Mihalakakou, Santamouris e Asimakopoulos (1992) sistematizaram registros de dados de temperaturas no solo, realizados pelo Observatório Nacional de Atenas, entre 1917 e 1990. O banco de dados foi constituído, então, por 74 anos de registros diários de temperaturas, nos horários de 8:00, 14:00 e 20:00 LST, para as profundidades de 0,30 m, 0,60 m, 0,90 m e 1,20 m, sob o solo, sem cobertura e coberto por grama rala. A difusividade térmica média do solo foi avaliada em $0,051 \text{ m}^2/\text{dia}$. São apresentados modelos simples de simulação da variação anual de temperatura do solo, na superfície e para várias profundidades. Também, são propostos algoritmos, não tão simples, para prever a variação diária da temperatura do solo. Os resultados das análises foram comparados com outros conjuntos conhecidos de dados, mostrando boa concordância. A distribuição temporal das temperaturas mostrou que tanto a temperatura média anual do solo, quanto a amplitude, são maiores para o solo sem cobertura,

do que para o solo coberto de grama rala. A partir dos dados experimentais, a defasagem no tempo da onda de temperatura, com a profundidade no solo, foi determinada em 23,5 dias/m.

Na continuidade do estudo anterior, Mihalakakou, Santamouris, Asimakopoulos e Argiriou (1995) apresentaram um modelo numérico transiente para determinar a temperatura do solo, para várias profundidades abaixo de edificações. O modelo proposto foi desenvolvido a partir de um complicado processo térmico tri-dimensional, que possibilitou o cálculo do fluxo de calor no solo. As principais dificuldades para a solução do problema foram: a tri-dimensionalidade do processo térmico, a forte variabilidade temporal da temperatura externa, bem como o grande número de parâmetros envolvidos na descrição da geometria das fundações da construção e, também, do isolamento térmico. Junto com a técnica de análise numérica dos fenômenos, foi usada a técnica de sobreposição dos efeitos térmicos, para vencer as dificuldades. O modelo foi validado usando dados experimentais e mostrou-se adequado para prever as temperaturas abaixo de edificações.

Jacovides, Mihalakakou, Santamouris e Lewis (1996) apresentaram um novo estudo das características do solo da região de Atenas. Novamente, são utilizados os registros, para o período de 1917 a 1990, das temperaturas na superfície e em várias profundidades no solo, para as condições de solo sem cobertura e coberto por grama rala, obtidos do Observatório Nacional de Atenas. As características de temperatura do solo são analisadas usando, agora, a técnica de Fourier. Os três primeiros harmônicos das séries de Fourier foram suficientes para reproduzir os modelos observados da temperatura do solo, na superfície e nas várias profundidades.

Outro modelo completo, para simular a variação diária e anual da temperatura da superfície do solo, foi proposto por Mihalakakou, Santamouris, Lewis e Asimakopoulos (1997). O modelo é baseado na equação diferencial de transferência transiente do calor por condução e usa, como condição de contorno, a equação do balanço de energia na superfície do solo. Esta equação envolve a troca de calor convectiva entre o ar e o solo, a radiação solar absorvida pela superfície do solo, o fluxo de calor latente devido à evaporação na superfície do solo, bem como a radiação de onda longa. O modelo foi validado, a partir de registros horários de temperatura, nas regiões de Atenas, Grécia e Dublin, Irlanda, durante dez anos, para solo sem cobertura e coberto com grama rala. Os resultados foram comparados com correspondentes valores obtidos usando a análise de Fourier, como descrito no estudo anterior, mostrando boa concordância. Foi avaliado o impacto de cada fator envolvido no balanço de energia na

superfície do solo, sobre o perfil de temperatura no solo.

3.1.2 Trocadores de calor solo-ar

Um trocador de calor solo-ar, constituído por 20 dutos de alumínio, com 15 m de comprimento, 0,2 m de diâmetro e 0,2 mm de espessura, foi instalado na profundidade de 2 m, em uma estufa para produção de flores, na Grécia. A temperatura da estufa foi controlada para circular o ar pelo trocador de calor, sempre que ficasse abaixo de 12 °C ou acima de 28 °C. Os registros de temperatura, feitos entre os meses de novembro e maio, foram analisados por Mavroyanopoulos e Kyritsis (1986) e mostraram a variação de temperatura do ar dentro da estufa, à noite, com valor médio de 8,1 °C e valor mínimo de 7 °C, enquanto a temperatura média do ar ambiente externo, no mesmo período, foi de -0,8 °C e a temperatura mínima chegou a -3 °C. A energia elétrica usada pelo ventilador do trocador de calor solo-ar foi equivalente a somente 20 % do ganho de energia com a circulação do ar da estufa no trocador de calor solo-ar.

O sistema de condicionamento térmico estudado por Levit, Gaspar e Piacentini (1989) consistiu de dutos enterrados horizontalmente no solo, os quais funcionavam como trocadores de calor solo-ar. O ar ambiente de uma estufa foi circulado nos dutos. Conforme os autores, o fluxo de ar, em dutos enterrados, deve variar entre 0,028 e 0,833 m³/s. Os dutos podem ser de qualquer material, com os seguintes requisitos: ser bom condutor de calor; não se deteriorar como consequência da umidade ou contato com componentes químicos presentes no solo; ser capaz de resistir às cargas permanentes ou acidentais que atuam sobre ele. O diâmetro dos dutos deve variar entre 0,10 e 0,40 m e o comprimento entre 6 e 30 m. Dois modelos matemáticos, que simulam, respectivamente, o comportamento térmico de estufas e o comportamento de dutos enterrados, foram adaptados e integrados para simular o comportamento do sistema. As equações de balanço de energia e massa foram estabelecidas com as seguintes simplificações: como os gradientes radiais de temperatura no solo, na vizinhança do duto, são significativamente maiores do que na direção axial, os termos na coordenada axial foram desconsiderados; e foi desconsiderada a variação da umidade no solo. A variação de temperatura do ar, na entrada dos dutos, foi feita igual à variação de temperatura interna na estufa. Não foram consideradas possíveis variações de temperatura entre os dutos enterrados. Com o objetivo de determinar as melhores características do sistema, sob o ponto de vista técnico e econômico, o modelo foi usado para calcular o aquecimento de uma estufa típica, na região úmida de La Pampa, na Argentina. Estabelecendo

diferentes temperaturas mínimas no interior da estufa, o programa fornece as características do sistema (quantidade, diâmetro, comprimento dos dutos, fluxo de ar, temperaturas e o número e potência dos ventiladores necessários) e calcula a eficiência do sistema (energia fornecida para a estufa/energia gasta com os ventiladores).

O desempenho energético de uma estufa para produção de hortaliças e tomates, dotada de um sistema de armazenamento de calor no subsolo, foi analisado por Boulard, Razafinjohany e Baille (1989). O sistema de armazenamento de calor se constituiu por um trocador de calor solo-ar com duas camadas de dutos de PVC (esgoto), diâmetro de 0,125 m, enterrados no solo nas profundidades de 0,50 e 0,80 m. O ar da estufa foi circulado pelos dutos por meio de um ventilador centrífugo. Foram realizadas medidas do desempenho térmico e microclimático do sistema, incluindo as trocas térmicas sensíveis e latentes, durante duas estações de aquecimento. Dos resultados, os autores afirmam que este tipo de trocador de calor pode ser usado no sul da França para manter, entre os meses de março e abril, à noite, uma diferença de temperatura de 7 a 9 °C, entre a temperatura do ar interno da estufa e o ar ambiente externo. O aquecimento auxiliar, necessário para manter a temperatura do ar em nível adequado à produção de hortaliças e tomates foi somente a 20 % do que seria necessário sem o sistema de armazenamento de calor no subsolo.

Continuando o estudo anterior, Boulard, Razafinjohany e Baille (1989a) usaram os dados experimentais do desempenho térmico e microclimático da estufa para validar um modelo dinâmico, tridimensional, de simulação do armazenamento de energia no solo, incluindo as trocas de calor sensível e latente, no fenômeno de transferência de calor. Os valores medidos e calculados foram comparados, mostrando boa concordância.

Considerando a variação anual dos parâmetros meteorológicos e a condição do solo de armazenar energia Sodha, Buddhi e Sawhney (1991) analisaram o desempenho de dutos enterrados, para circular o ar ambiente com a finalidade de aquecer ou resfriar ambientes. As análises mostram que, dependendo dos valores dos parâmetros do ar circulante, existe um comprimento ótimo do duto, para o qual o potencial de aquecimento anual por unidade de comprimento do duto é máximo. Foi considerado, nas análises, o efeito de diferentes tratamentos na superfície do solo, no desempenho térmico do ar circulante nos dutos, bem como os comprimentos ótimos foram investigados para a condição de clima quente e seco e clima frio e seco, típicos de cidades da Índia.

Tzaferis, Liparakis, Santamouris e Argiriou (1992) avaliaram 8 algoritmos, anteriormente propostos por outros pesquisadores, para modelar o desempenho de trocadores de calor solo-ar (dutos enterrados). A precisão e a sensibilidade dos modelos foram analisadas, em função da temperatura do ar na entrada do duto enterrado, da velocidade do ar, do comprimento do duto, do raio do duto e da profundidade do duto. Para validar os modelos, foram projetados e executados dois experimentos diferentes e os resultados experimentais foram comparados com os valores preditos pelos modelos. As análises mostraram que os principais parâmetros determinantes da temperatura de saída do ar, no trocador de calor solo-ar, foram a temperatura do ar, na entrada do trocador, e a temperatura do solo, a qual é função da profundidade do trocador. Considerando a velocidade do ar dentro do trocador, esta temperatura na saída do trocador apresentou tendência de aumentar, significativamente, até valores da velocidade próximos de 6 m/s, com tendência de se tornar praticamente estável após este valor. Apresentou, ainda, a tendência de diminuir rapidamente com o aumento do comprimento do duto, tendendo a um valor constante para o comprimento, em torno de 50 m. Mantendo a velocidade do ar constante, a temperatura de saída mostrou a tendência de aumentar rapidamente com o raio do duto, para valores do raio até 0,15 m. Para raio maior que 0,20 m, praticamente se manteve constante. Diminuiu exponencialmente com a profundidade do duto, ficando praticamente constante a partir dos 4 m de profundidade. O decréscimo mais importante ocorreu para pequenas profundidades: para os primeiros 3 m de profundidade, a temperatura caiu 5 °C, mas entre 3 m e 4 m, diminuiu somente 0,5 °C.

Dando sequência ao estudo sobre o potencial sazonal do sistema de circular ar por dutos enterrados no solo, para resfriar o ar ambiente, em regiões quentes e secas na Índia, Sodha, Buddhi e Sawhney (1993) aprofundaram a investigação sobre o efeito do comprimento, do raio do duto, do material da parede do duto e do fluxo de ar nos dutos, buscando o máximo potencial de resfriamento do ar.

Trombe e Serres (1994), buscando contribuir para divulgar o potencial do uso de trocadores de calor solo-ar, para economizar energia convencional em edificações residenciais, desenvolveram um modelo de simulação simplificado do trocador de calor, admitindo a troca térmica solo-ar em regime estacionário, a temperatura do solo constante durante a troca térmica e a constância das propriedades térmicas do solo. O modelo foi validado, a partir de dados experimentais obtidos de um experimento realizado, tendo em vista demonstrar a eficiência do sistema, quando acoplado a uma residência. As trocas de calor através das paredes da edificação foram avaliadas em regime transiente. Os autores afirmam que o

sistema pode ser usado para economizar até 10 % do consumo de energia convencional da residência e que o sistema se mostra adequado por pré-aquecer o ar ambiente no inverno, por evitar o risco de congelamento na habitação, durante o inverno; por resfriar o ar e melhorar as condições de conforto, no verão. A análise mostrou a temperatura ambiente da residência igual a 27 °C no verão, sem a ajuda do sistema de ar condicionado. São apresentados os dados decorrentes do monitoramento do comportamento térmico da residência e do trocador de calor solo-ar.

Um modelo numérico completo, para determinar o desempenho térmico de trocadores de calor solo-ar, foi apresentado por Mihalakakou, Santamouris e Asimakopoulos (1994). Segundo os autores, modelos propostos anteriormente, avaliados no estudo de Tzaferis, Liparakis, Santamouris e Argiriou (1992), antes apresentado, não consideram o fenômeno de transferência de calor latente entre o ar circulante e o duto. Outros modelos simplificados também ignoram o fenômeno de transferência de calor (sensível e latente) no solo. O modelo proposto considera, simultaneamente, as transferências de calor e massa, no interior do duto e no solo, tendo em conta a estratificação térmica natural do solo. Os algoritmos propostos possibilitam estimar a variação da temperatura e umidade do ar circulante e a distribuição de temperatura e umidade no solo. O sistema transiente do trocador de calor solo-ar foi proposto em coordenadas polares, com 3 coordenadas independentes: radial (r), longitudinal (y), e temporal (t); e 2 coordenadas dependentes: temperatura do solo (T) e o conteúdo de umidade do solo (h : kg de umidade (água e vapor) no solo, por kg de solo seco). Para um ponto na vizinhança do duto, a temperatura do solo é estimada por superposição da distribuição de temperatura, devido à presença do duto, com a distribuição natural de temperatura no solo, não perturbada pela presença do trocador de calor e decorrente da variação de temperatura na superfície. As equações diferenciais, correspondentes ao balanço de energia e a transferência de massa, foram discretizadas, usando um método definido como *control-volume formulation*, semelhante ao método de diferenças finitas, mas com procedimentos típicos da metodologia de elementos finitos. A dependência do tempo foi resolvida usando técnicas de integração implícita e as equações algébricas foram resolvidas usando Gauss-Seidel. O modelo foi desenvolvido dentro do programa TRNSYS. Para validar o modelo, um tubo plástico de 0,150 m de diâmetro e 14,8 m de comprimento foi enterrado no solo, na profundidade próxima a 1,10 m. A velocidade do ar no duto foi de 10,5 m/s. A temperatura do ar e a temperatura do solo, para diferentes profundidades, abaixo e acima do duto enterrado, foram monitoradas durante quinze dias, no verão. Não foi possível fazer medidas de umidade neste experimento,

mas o solo estava bastante seco. Foi registrada a variação da temperatura externa. Os resultados experimentais foram comparados com os cálculos teóricos e a concordância foi excelente. São apresentados os seguintes gráficos: valores medidos e calculados da temperatura do ar, na saída do duto, durante o experimento; comparação dos valores medidos e calculados da temperatura do ar no duto, para uma distância de 3 m, a partir da entrada do duto; temperatura do solo, medida e calculada, para 20 cm acima do duto (profundidade de 90 cm), e 7 m de distância, a partir da entrada do duto, durante o experimento; comparação da temperatura do solo, medida e calculada, para 30 cm de distância, a partir da superfície do solo (80 cm acima do duto), e 7 m de distância, a partir da entrada do duto; comparação da temperatura do solo, medida e calculada, para 60 cm de distancia, a partir da superfície do solo (50 cm acima do duto), e 7 m de distância, a partir da entrada do duto.

Com base no estudo acima, Mihalakakou, Santamouris e Asimakopoulos (1994a) analisaram o desempenho de um sistema constituído por N dutos paralelos enterrados no solo. A técnica da superposição foi usada na análise do processo térmico, tendo por referência o desempenho do duto simples. O processo foi montado a partir da quantidade de calor que o ar circulante, em cada duto, transfere para o solo e a sobreposição da influência desta transferência, com aquela decorrente da posição no solo dos demais dutos do sistema. A equação que relaciona a temperatura do ar que circula nos dutos e o calor transferido dos dutos para o solo e para os dutos vizinhos se constitui por um termo, que expressa a variação de temperatura do ar ao longo do duto, devido a sua própria condutância térmica, e por outro termo, que é a flutuação da temperatura do ar no duto considerado, devido à influência dos outros dutos. Como exemplo, foi simulado o sistema de equações relativo a um trocador de calor, com 4 dutos paralelos, de mesmo comprimento e raio, enterrados na mesma profundidade no solo e com espaçamentos iguais entre dutos adjacentes. A temperatura calculada para o ar, na saída de um duto posicionado internamente, na disposição física dos dutos no trocador de calor, foi comparada com a temperatura prevista de saída do ar, em um trocador constituído por um único duto. Para este propósito foi admitido o duto plástico, com 0,125 m de raio e 30 m de comprimento, enterrado no solo a 1,5 m. O duto foi considerado na situação de duto posicionado internamente, na disposição física do trocador constituído de 4 dutos paralelos e, também, na situação de duto único, em um trocador de um só duto. O afastamento entre dutos foi feito igual a 1,5 m e a velocidade do ar, no interior do duto, igual a 10 m/s. Os cálculos foram feitos usando séries históricas de temperaturas horárias do ar e do solo, na região de Atenas, entre 9 horas e 19 horas do dia, abrangentes a um período de verão e durante 10 anos.

As frequências acumuladas de ocorrência das temperaturas de saída do ar no duto interno e no duto único foram colocadas em gráficos em função da temperatura. Para uma dada temperatura, a frequência acumulada relativa ao duto único foi sempre superior a frequência relativa ao duto interno. Visando validar o modelo foi montado um experimento: quatro dutos de plástico de 0,125 m de raio e 30 m de comprimento foram enterrados no solo na profundidade de 1,5 m. A distância entre os dutos adjacentes foi 4m e a velocidade do ar nos dutos igual a 9 m/s. As temperaturas foram registradas, a cada 10 minutos, para diferentes pontos ao longo do duto. O experimento transcorreu durante um período de verão e por 13 dias. Os valores observados de temperaturas foram registrados em um gráfico, em função dos valores calculados, mostrando boa concordância. A maior diferença não excedeu 0,5 °C. As frequências cumulativas de ocorrência das temperaturas do ar, na entrada e na saída de um duto interno do trocador de calor, mostram a temperatura do ar, na saída do duto, flutuando entre 24,1 e 29,7 °C e a temperatura do ar, na entrada do duto, flutuando entre 23,2 e 40 °C. Estes valores confirmam o potencial dos dutos enterrados, como método para resfriar o ar ambiente. A simulação do comportamento do trocador de calor foi feita com comprimentos do duto de 20, 30 e 40 m. O gráfico da temperatura do ar, na entrada e na saída do duto interno no trocador de calor, em função do tempo, mostra que um aumento no comprimento do duto resulta na redução na temperatura do ar, na saída do duto, o que representa um aumento do potencial da capacidade do sistema em resfriar o ar ambiente. A simulação do comportamento do trocador de calor foi feita com três diferentes raios (0,125; 0,180; e 0,250 m), enquanto os outros parâmetros foram mantidos constantes. O gráfico da temperatura do ar, na saída do duto interno no trocador de calor, em função do tempo, mostra que o aumento do raio do duto resulta no aumento da temperatura do ar, na saída do duto, reduzindo a capacidade do sistema em resfriar o ar ambiente. Isto se explica pela redução do coeficiente de transferência de calor por convecção no duto, com o aumento do raio. A simulação da influência da profundidade do duto no solo foi feita para as profundidades de 2,5 m e 4,0 m. A temperatura do ar, no duto interno do trocador de calor, diminui com a profundidade, aumentando significativamente a capacidade do sistema em resfriar o ar ambiente. A partir de 4 m de profundidade, entretanto, a temperatura do solo para de diminuir e a capacidade do sistema fica inalterada. Quatro diferentes afastamentos foram usados na simulação (0,5; 1,5; 2,5; e 5,0 m). A profundidade dos dutos no solo foi, inicialmente, igual a 1,5 m. Posteriormente, a simulação foi feita, também, para as profundidades de 2,5 e 5,0 m. Uma análise geral, incluindo tanto o comportamento da temperatura do ar nos dutos posicionados internamente, como nos dutos posicionados externamente no trocador de calor (4 dutos),

indica que um aumento no espaçamento entre dutos adjacentes resulta na redução da temperatura do ar no duto, aumentando a capacidade do sistema em resfriar o ar ambiente.

Com o objetivo de simplificar os procedimentos para o projeto e avaliação de trocadores de calor solo-ar, bem como disponibilizar informações do potencial de resfriamento destes sistemas, Mihalakakou, Santamouris e Asimakopoulos (1994b), usando o modelo numérico, transiente e implícito, referido acima, fizeram uma extensiva investigação sobre o impacto dos principais parâmetros de projeto, no potencial de resfriamento do sistema. Distribuições da frequência cumulativa do desempenho do trocador de calor foram desenvolvidas, em função dos parâmetros de entrada. Foi simulado o desempenho de um duto de plástico, de 0,125 m de raio e 30 m de comprimento, enterrado no solo a cerca de 1,20 m. A velocidade do ar no duto foi 5 m/s. Os cálculos foram feitos para o período de 1981 a 1990, nos meses de junho, julho e agosto e para o intervalo entre 9 horas e 19 horas. Foram usados dados horários de temperatura do ar e do solo, obtidos de registros feitos pelo Observatório Nacional de Atenas. Foi estimado que a temperatura do ar, na saída do duto, flutua no intervalo de 20,7 °C a 23,7 °C, no mês de junho; de 23,3 °C a 27,0 °C, no mês de julho; e de 25,1 °C a 28,5 °C, no mês de agosto. As correspondentes medidas da temperatura do ar, na entrada do duto, variaram entre os limites de 20,9 °C a 37,8 °C, no mês de junho; de 23,2 °C a 40 °C, no mês de julho e de 25,3 °C a 39,3 °C, no mês de agosto. A análise mostrou que o potencial de resfriamento dos trocadores de calor é muito importante no verão. Durante o mês de junho, a temperatura do ar, na saída do duto, esteve sempre abaixo de 24 °C; no mês de julho, esteve abaixo de 25,5 °C, em 90 % dos casos, e no mês de agosto menor que 26 °C, em 70 % dos casos. Foi avaliada a sensibilidade do modelo, em função do comprimento do duto, raio do duto, velocidade do ar e profundidade do duto no solo.

A influência de diferentes tipos de cobertura (condições de contorno) sobre a superfície do solo na eficiência de trocadores de calor solo-ar, constituídos por um único duto ou vários dutos paralelos enterrados, foi investigada por Mihalakakou, Santamouris, Asimakopoulos e Papanikolaou (1994). O potencial de resfriamento destes sistemas, enterrados sob solo sem cobertura, foi comparado com o potencial dos mesmos sistemas, enterrados sob solo coberto por grama rala. Os resultados revelam que o tipo de cobertura da superfície do solo pode ser explorado, como um fator de melhoria do desempenho, nos trocadores de calor solo-ar.

No estudo de Santamouris, Mihalakakou, Balaras, Argiriou, Asimakopoulos e Vallindras (1995), os dados de temperatura do ar, obtidos de uma estufa localizada na região de Atenas,

com área de 1.000 m², coberta com fibra de vidro e equipada com um sistema de 4 dutos paralelos enterrados no solo, foram comparados com valores simulados no modelo numérico transiente, apresentado por Mihalakakou, Santamouris e Asimakopoulos (1994 e 1994a). As simulações foram realizadas para um período de 1981 a 1990, para os meses de verão (junho, julho, agosto e setembro), usando dados horários de temperatura do ar e do solo, entre 9 e 19 horas, registrados pelo Observatório Nacional de Atenas. A análise mostra que os trocadores de calor solo-ar podem ser usados para atenuar o consumo de energia em estufas agrícolas, diminuindo a temperatura do ar interno no verão e pré-aquecendo o ar no inverno. Do ponto de vista econômico, a instalação de um sistema com 4 dutos plásticos, enterrados paralelamente no solo, para uma estufa de 1.000 m², representa cerca de 5 % do investimento. A energia consumida pelo ventilador do sistema, o qual injeta o ar interno à estufa nos dutos enterrados, representa cerca de 8 % da energia fornecida ao sistema. O estudo foi validado por dados experimentais do desempenho da estufa, registrados no verão, em um período de duas semanas de junho, mostrando boa concordância. A temperatura do ar interno na estufa, no verão: diminuiu com o aumento do comprimento dos dutos; diminuiu com o diâmetro; aumentou com a profundidade do duto no solo, até a profundidade de 4 m, e decresceu com a velocidade do ar no interior do duto.

Jacovides e Mihalakakou (1995) propõem para a simulação do desempenho de trocadores de calor solo-ar, um modelo numérico transiente e implícito, que considera as transferências simultâneas e acopladas de massa e calor, no interior do solo e nos dutos. O modelo inclui uma completa descrição do fenômeno de migração da umidade através do solo, com a temperatura. O gradiente de umidade tende a redistribuir o conteúdo de umidade no solo. O modelo foi validado contra dois conjuntos de dados experimentais e considerado preciso. Os algoritmos foram desenvolvidos dentro do programa TRNSYS.

Um estudo que integra a análise do desempenho térmico de edificações e a análise da contribuição de trocadores de calor solo-ar, para este desempenho, foi apresentado por Santamouris, Mihalakakou, Argiriou e Asimakopoulos (1995). O modelo é baseado no princípio da temperatura do ponto de equilíbrio e permite o cálculo dos valores horários da temperatura de equilíbrio na edificação, bem como a energia diária para resfriamento da edificação e a contribuição dos dutos enterrados. O modelo foi validado por meio de dados experimentais, a partir de uma versão estendida do TRNSYS, que inclui rotinas detalhadas para simular dinamicamente o desempenho de trocadores de calor solo-ar.

Um interessante modelo paramétrico, para simular o desempenho térmico de trocadores de calor solo-ar, foi apresentado por Mihalakakou, Santamouris, Asimakopoulos e Tselepidaki (1995). O propósito do modelo foi facilitar aos engenheiros e projetistas a avaliação dos valores de temperatura e desempenho energético do ar circulante, na saída dos dutos enterrados, a partir do uso de tabelas, tendo por referência quatro parâmetros fundamentais no processo: comprimento e raio do duto enterrado, velocidade do ar dentro do duto e profundidade do duto no solo. Foi definido um parâmetro \underline{U} , adimensional no estudo, que relaciona duas diferenças de temperatura: a diferença entre a temperatura do ar, na entrada do duto, e a temperatura no solo; e a diferença entre a temperatura do ar, na saída do duto, e a temperatura do solo. A técnica de análise por regressão (regressão parabólica) foi usada para gerar a base de dados para o parâmetro adimensional \underline{U} , correspondente aos dados relativos aos quatro parâmetros fundamentais no estudo, antes referidos. O parâmetro \underline{U} foi normalizado e os coeficientes da equação de normalização foram colocados em tabelas, de forma a possibilitar sua avaliação. O modelo foi validado contra dados experimentais, bem como contra valores calculados de modelos numéricos, os quais simulam o desempenho térmico de trocadores de calor solo-ar, mostrando boa concordância.

Mihalakakou, Lewis e Santamouris (1996), voltaram a estudar a influência de diferentes tipos de cobertura do solo no potencial térmico dos trocadores de calor solo-ar, constituídos por um único duto ou múltiplos dutos paralelos. Com base no modelo numérico, antes desenvolvido, e apresentado em Mihalakakou, Santamouris e Asimakopoulos (1994a), analisaram dez anos de registros horários de temperaturas do ar e do solo, na região do aeroporto de Dublin, Irlanda. As simulações foram feitas para o período de inverno, cobrindo os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, entre 1974 e 1984. O potencial dos trocadores de calor enterrados no solo, sem qualquer tipo de cobertura, foi avaliado e comparado com o potencial dos mesmos trocadores, quando enterrados no solo, com cobertura de grama rala. A avaliação foi feita, tendo por referência os principais parâmetros de projeto, tais como: o comprimento e o raio dos dutos, a velocidade do ar no interior dos dutos e a profundidade dos dutos no solo. O resultado desta comparação, novamente, mostrou que o tipo de cobertura do solo pode ser um importante fator na eficiência dos trocadores de calor solo-ar. O solo sem cobertura pode aumentar a capacidade de aquecimento do sistema.

O estudo, antes apresentado, sobre o desempenho, no período de verão, de uma estufa localizada na região de Atenas, com área de 1.000 m², coberta com fibra de vidro e equipada com um sistema de 4 dutos paralelos enterrados no solo, foi continuado para simular o

período de inverno. Santamouris, Mihalakakou, Balaras, Lewis, Vallindras, Argiriou (1996) consideraram, nesta nova etapa de estudo, o efeito, para aquecimento do ar, de uma parede armazenadora de calor, orientada para o norte, existente na estufa. As simulações foram realizadas para um período de 1981 a 1990, nos meses de inverno (dezembro, janeiro, fevereiro e março), usando dados horários de temperatura do ar e do solo, entre 9 e 19 horas, registrados pelo Observatório Nacional de Atenas. O estudo foi validado por dados experimentais do desempenho da estufa, registrados no inverno. Em relação às conclusões referidas no estudo anterior, como era esperado, mudou o comportamento da temperatura do ar interno na estufa, que aumentou com o aumento do comprimento dos dutos.

Outro estudo, antes apresentado, em que são analisados dez anos de registros horários de temperaturas do ar e do solo, na região do aeroporto de Dublin, Irlanda, foi retomado, para enfatizar as principais variáveis que influenciam no desempenho dos trocadores de calor solo-ar: comprimento e raio dos dutos; velocidade do ar dentro do duto; e profundidade do duto no solo. Mihalakakou, Lewis e Santamouris (1996a) analisaram a frequência cumulativa da temperatura do ar na saída dos dutos, em função de cada uma das variáveis referidas acima, que são os parâmetros de entrada no processo de análise do desempenho dos trocadores de calor solo-ar.

Gauthier, Lacroix e Bernier (1997) apresentaram um estudo numérico do comportamento térmico de trocadores de calor solo-ar, associados às estufas comerciais. Definiram o sistema como trocadores-armazenadores de calor, visto que o objetivo foi investigar o potencial dos dutos enterrados, como elementos de um sistema contínuo e cíclico de troca de energia entre o solo e a estufa, pelo armazenamento de energia no solo. A energia armazenada ou retirada do solo, durante um período é, respectivamente, entregue ou reposta no período seguinte. O desempenho destes sistemas foi analisado, com o objetivo de reduzir o consumo de energia em estufas. Um modelo, baseado na técnica de diferenças finitas, totalmente tridimensional, foi usado para simular a troca de calor transiente, apoiado nas equações de conservação da energia no solo e no ar circulante. O modelo se baseia nas seguintes hipóteses: a transferência de calor por condução é transiente e totalmente tri-dimensional no solo; as propriedades termo físicas do solo são constantes e independentes da temperatura, mas o solo pode ser não homogêneo; a transferência de calor causada pelo gradiente de umidade no solo é desconsiderada, com respeito àquela decorrente do gradiente de temperatura; a transferência de calor nos dutos é dominada pela convecção na direção radial. Ela é, contudo, acoplada com o campo de temperatura no solo, via condições de contorno na superfície dos dutos;

condensações e evaporações nos dutos não são consideradas; e, a seção circular dos dutos é modelada como seção quadrada equivalente. O modelo foi validado com dados experimentais obtidos de estufas comerciais. As simulações indicam que a quantidade de energia armazenada ou recuperada do solo, diariamente, por unidade de volume, diminui exponencialmente com o afastamento entre dutos e o comprimento do duto. Ela aumenta com a velocidade do ar e esse efeito é acentuado quando o afastamento entre dutos diminui. A velocidade do ar igual a 4 m/s parece ser ótima. Quando a umidade no solo aumenta, cresce a quantidade de energia armazenada ou recuperada do solo, diariamente, por unidade de volume, mas este efeito pode ser negligenciado, em decorrência do grande comprimento do duto e das baixas velocidades do ar. Em relação ao armazenamento de energia, a simulação de isolamento lateral melhorou o desempenho do sistema, mas a simulação de isolamento por baixo dos dutos foi mais significativa. Dutos mais profundos no solo permitiram armazenar mais energia durante o dia, mas durante o período da noite a perda de energia através da superfície do solo foi menor e o rendimento do sistema diminuiu.

Hollmuller e Lachal (2001) estudaram o potencial térmico dos sistemas de dutos enterrados, considerando a diferença de desempenho entre a condição de pré-aquecimento do ar ambiente, nos períodos frios de inverno, e a condição de resfriamento do ar ambiente, nos períodos quentes de verão, tendo como referência o clima da Europa Central. O ponto inicial do estudo foi uma extensiva campanha de monitoramento destes sistemas, acoplados a estufas agrícolas, com o propósito de armazenar, no solo, o calor solar excessivo dentro destas estufas, no período diurno, para aproveitamento nos períodos de aquecimento, como estratégia para reduzir o consumo de combustível nestas estufas. Um dos dispositivos analisados consistiu de 24 dutos de PVC (16 cm de diâmetro, 11 m de comprimento e 33 cm de afastamento entre eixos), enterrados 80 cm abaixo da estufa. Foi observado que, junto com a parcela sensível, deve ser considerada a parcela latente, no balanço de energia das trocas de calor do sistema. Com base nos estudos de Boulard, Razafinjohany e Baille (1989 e 1989a) antes referidos, foi desenvolvido um modelo numérico explícito, que considera, simultaneamente, os fenômenos das trocas térmicas sensíveis e latentes, bem como considera as perdas por atrito e infiltrações de água e fluxo de ar, ao longo dos dutos. O modelo foi adaptado ao programa TRNSYS. As análises mostraram que as trocas de calor sensível foram bem reproduzidas pelo modelo e estas trocas não foram muito influenciadas pelas infiltrações de água nos dutos. Isto não se reproduziu para a evaporação e condensação, para as quais os dados monitorados foram incipientes. Quanto aos aspectos econômicos, o pré-aquecimento do

ar, usando dutos enterrados, mostrou-se mais dispendioso do que com o uso de óleo combustível, o qual não pode ser substituído completamente. Para o resfriamento do ar, entretanto, a inércia térmica de dutos enterrados se mostrou competitiva, em relação ao uso de ar condicionado.

Um modelo numérico para simular o sistema de armazenamento de calor no solo, acoplado ao comportamento térmico de estufas destinadas à plasticultura, foi desenvolvido por Garcia (2001). Utilizando o Método dos Volumes Finitos, o estudo reproduz os resultados, antes referidos, obtidos por Gauthier, Lacroix e Bernier (1997). O solo foi tratado como um meio difusivo e foi considerado o fenômeno de evaporação nos dutos. O modelo transiente e tridimensional simulou o acoplamento das trocas de calor entre o ar nos dutos e o solo ao redor dos dutos. A migração de umidade no solo não foi considerada.

Hollmuller (2003) apresentou uma solução analítica completa para o fenômeno de difusão de calor, em um trocador de calor solo-ar cilíndrico, com condições de contorno isotérmicas e adiabáticas, submetidas a um fluxo de ar constante, com variação de temperatura harmônica na entrada do trocador. Foi demonstrada a relação entre o amortecimento da amplitude e a defasagem da onda de temperatura do fluxo de ar e mostrado que, dependendo de sua espessura, a camada de solo, sobre o trocador de calor, induz um ou dois tipos de regimes de amortecimento da amplitude e da defasagem da onda de temperatura do fluxo de ar. Com uma camada de solo espessa, as condições de contorno isotérmicas e adiabáticas têm efeitos equivalentes na temperatura do fluxo de ar: a onda de calor diminui de amplitude e se defasa, com o aumento da espessura da camada de solo; a defasagem mostra-se como um fenômeno secundário, frente ao amortecimento da onda de temperatura. Com a diminuição da camada de solo, as condições de contorno vêm a ser diferentes, uma da outra: com a condição de contorno isotérmica, o comportamento é semelhante ao descrito acima, para uma camada espessa de solo; para a condição adiabática, o comportamento se inverte, a amplitude mostra-se como um fenômeno secundário frente à defasagem. Esta observação induziu ao estudo experimental de um sistema, que fosse capaz de deslocar o pico de temperatura ao longo das horas, quase sem amortecimento, para que, por exemplo, o pico noturno de baixa temperatura fosse disponível durante o dia e vice e versa. Este sistema foi definido como o *defasador térmico*. Os resultados analíticos foram comparados com os dados experimentais e simulações foram feitas por meio de modelos numéricos. Em ambos os casos, as comparações mostraram boa concordância.

Um estudo sobre o comportamento térmico de um duto enterrado, usado para melhorar as condições térmicas, no verão, do laboratório de uma escola na região de La Pampa, na Argentina, foi descrito por Larsen, Filippin e Lesino (2003). O projeto da escola usa técnicas passivas para diminuir a necessidade de energia na edificação. O duto, com paredes de tijolos de 0,11 m de espessura e seção retangular interna de 0,40 m, de altura, e 0,65 m, de largura, foi construído na profundidade de 0,40 m. O comprimento do duto foi de 29 m. Foram monitoradas a velocidade, a temperatura e a umidade do ar naturalmente circulante no duto, na entrada, na saída e em mais duas posições intermediária no duto. Também, foram monitoradas a temperatura externa, a radiação solar e a temperatura interna do laboratório. O comportamento térmico do duto foi simulado por meio de um modelo numérico, acoplado ao SIMEDIF, um programa usado para simular o comportamento transiente de edificações. Os conjuntos de dados calculados e monitorados foram comparados e se mostraram com boa concordância. Foi observado que a temperatura do ar, na saída do duto, foi 2 °C menor que a temperatura interna do laboratório, medida 2 m acima do piso.

Um estudo sobre o processo de transferência simultânea de calor e umidade, em solos insaturados, visando o uso de dutos enterrados, como fonte primária de calor no aquecimento de estufas agrícolas, foi desenvolvido por Rodriguez (2005). O sistema de equações diferenciais do problema foi resolvido numericamente, usando o Método dos Volumes Finitos e, na discretização, foi usada uma integração temporal totalmente implícita. Denominando o sistema de dutos enterrados como sistema trocador-armazenador de calor, o autor faz a simulação de quatro modelos computacionais: um duto isolado; um duto com convecção; dois dutos isolados; e dois dutos com convecção. A temperatura de entrada do ar nos dutos, bem como a temperatura do ar ambiente, esta última necessária na análise dos modelos com convecção, foram admitidas com variação senoidal. Foram usados valores recomendados na literatura para os parâmetros necessários na simulação dos modelos. O diâmetro do duto isolado foi feito igual a 0,10 m, a velocidade do ar no interior do duto foi considerada igual a 4 m/s e o conteúdo de umidade do solo, igual a 0,25. O comprimento do duto foi variado de 5 até 20 m e o afastamento entre centros dos dutos de 0,20 até 0,30 m. As análises mostram que, em termos da quantidade de calor armazenado no solo, não houve diferença significativa entre a simulação usando as equações de energia e de massa acopladas e a simulação usando a equação da temperatura. Os perfis de temperatura e umidade mostraram que, durante o dia, o solo absorve calor do ar circulante nos dutos e existe migração de umidade no solo, para as regiões próximas à superfície do duto. Durante a noite ocorre o contrário, o solo fornece calor

para o ar circulante nos dutos e, desta forma, as regiões próximas aos dutos apresentam níveis de umidade superiores aos iniciais.

Athienitis, Roy e Zhao (2005) descrevem o projeto e a simulação de um sistema de ventilação híbrido, para um anfiteatro de construção recente, em Montreal. Um sistema HVAC aspira ar novo, através de dois dutos subterrâneos, que possibilitam este ar trocar calor com o solo, para aquecimento ou resfriamento. Outra característica do sistema é que a insuflação de ar ocorre na parte inferior do ambiente, a baixas velocidades (no máximo 0,2 m/s), através de grandes difusores, colocados atrás dos assentos superiores ou sob os assentos. Este ar absorve os ganhos térmicos decorrentes da presença de pessoas e iluminação do anfiteatro, sobe por flutuabilidade, sendo re-circulado por 4 retornos, posicionados na parte superior do ambiente, ou renovado, pela ação do exaustor acoplado à chaminé central. A simulação numérica do trocador de calor solo-ar mostra este sistema constituído por 2 dutos de aço galvanizado corrugados, de 60 m de comprimento e 1 m de diâmetro. Para a situação de resfriamento do ar, que é a mais comum para o anfiteatro, devido ao grande número de pessoas e altos ganhos internos, admitindo a temperatura do solo igual a 8,4 °C, a temperatura do ar na saída dos dutos foi predita em 21 °C. Os fluxos de ar admitidos na análise foram: 4.700 litros por segundo de ar de renovação e 8.500 litros por segundo de ar re-circulado, de um fluxo total de 13.200 litros por segundo. Esta predição se confirmou durante o uso do anfiteatro, em setembro de 2004, quando o EAHE se mostrou suficiente para o conforto das pessoas. Sensores de CO₂ foram usados, para ajustar a quantidade de ar renovado, e a temperatura do ar no retorno, ou seja, no sistema de exaustão foi assumida igual a 25 °C. A situação de aquecimento, para o mês de janeiro, mostra um acréscimo de 9 °C no ar (de -15 °C para -6 °C) e a necessidade de suplementação no processo de aquecimento, para o ar atingir a faixa de conforto, entre 20 °C e 25 °C. O estudo CFD, do sistema HVAC, foi realizado com o *software* FLUENT. O escoamento de ar foi admitido turbulento (modelo $k - \epsilon$), acoplado à transferência de calor por radiação (*radiosity model with view factor calculation*). Foi utilizado o recurso da simetria para reduzir o tamanho do modelo, sendo empregada, na maioria das simulações, a metade do anfiteatro como domínio computacional. Os principais objetivos do estudo numérico foram: definir o tamanho e a localização dos difusores de ar, assim como dos retornos, de maneira a evitar altas velocidades do ar (maiores de 0,2 m/s), próximo da platéia e do palco; dimensionar a chaminé para exaustão parcial ou total do ar, considerando a convecção natural quando isso for vantajoso; investigar o comportamento do sistema com a chaminé fechada (todo o ar sendo re-circulado).

Uma avaliação do potencial dos dutos enterrados e do defasador térmico, como estratégias para resfriamento passivo de edificações sujeitas aos diversos climas brasileiros, foi apresentada por Hollmuller, Carlo, Ordenes, Westphal e Lamberts (2006). Este estudo é uma aplicação às condições climáticas do Brasil dos achados no estudo de Hoollmuller (2003), descritos acima. Neste contexto, o novo defasador térmico é o defasador de fase do estudo anterior, materializado na forma como um sistema de armazenamento de calor, do tipo leito de rochas, de dimensões bastante precisas e com melhorias nas trocas de calor convectivas, para simular o comportamento do solo, com superfície adiabática, sobre o ar que circula em dutos enterrados, a pequenas profundidades. Como já referido antes, a expectativa é deslocar o pico da onda de temperatura ao longo das horas, quase sem amortecimento, para que o pico noturno seja disponível durante o dia e, assim, aumente a eficiência do sistema no resfriamento do ar do ambiente. Numa primeira etapa do estudo, foi caracterizado o potencial de resfriamento, independente do tipo de edificação, para os climas das cidades do Rio de Janeiro, Recife, Brasília, São Paulo, Florianópolis e Porto Alegre. Numa segunda etapa, foi avaliada, usando o programa EnergyPlus, a resposta térmica de dois protótipos de edificações, comerciais e residenciais, para climas de São Paulo e Florianópolis, considerando duas situações: com e sem climatização. A análise referente à primeira etapa do estudo mostrou que a ventilação inercial não apresentou benefícios para os climas relativos às regiões do Rio de Janeiro e Recife e que, para os climas das regiões de Brasília, São Paulo, Florianópolis e Porto Alegre, as condições foram mais favoráveis. A análise referente à segunda etapa do estudo, para edificações sem ar condicionado, mostra que o uso de elementos de proteção solar para a envoltória da edificação deve ser sempre a primeira medida a ser adotada e que a ventilação inercial pode contribuir com uma redução nas temperaturas extremas de 1 a 3 °C. Para edificações equipadas com ar condicionado, as análises mostraram que o uso da ventilação inercial é limitado.

Florides e Kalogirou (2007) abordam o uso do solo, como elemento de sistemas com potencial para absorver ou ceder calor, no resfriamento ou aquecimento, respectivamente, de edificações. Estes sistemas se dispõem na forma de dutos enterrados na horizontal, ao longo do comprimento da construção ou enterrados verticalmente no solo. Um meio circulante (água ou ar) é usado, no verão, para extrair calor do meio ambiente aquecido da edificação e transferi-lo para o solo e vice-versa, no inverno. Bombas de calor podem ser usadas para melhorar a eficiência do sistema. Os autores concluem que, para uma determinada profundidade, a temperatura do solo é sempre maior que a temperatura do ar ambiente

externo, no inverno, e menor, no verão. Esta diferença de temperatura pode ser usada para um pré-aquecimento do ar externo, no inverno, e um pré-resfriamento, no verão, operando o trocador de calor solo-ar. Recomendam a profundidade de 1,5 m a 2,0 m, para a colocação dos dutos nos trocadores de calor horizontais, e o afastamento entre dutos múltiplos, de 0,30 m, e entre valas, escavadas para colocação dos dutos, de no mínimo 2,0 m. Nos trocadores de calor verticais, as perfurações têm entre 20 m e 300 m de profundidade e diâmetro entre 0,10 m e 0,15 m. A distância entre furos deve ser, no mínimo, 5,0 m, para evitar a perda de eficiência do sistema. Geralmente, a eficiência dos trocadores de calor solo-ar aumenta com o aumento do comprimento e da profundidade dos dutos. A capacidade de aquecimento do sistema diminui com o aumento do diâmetro do duto, e o aumento da velocidade de escoamento do ar no sistema leva para uma redução de sua capacidade de aquecimento, principalmente devido ao aumento do fluxo dentro do duto.

Zhang e Haghghat (2009) usam a dinâmica dos fluidos computacional (*computational fluid dynamics* – CFD) para investigar o escoamento e o comportamento térmico do ar, em grandes dutos enterrados horizontalmente, com o objetivo de aproveitar a capacidade de armazenamento térmico do solo, para diminuir as variações de temperatura do ar ambiente, através da injeção de ar externo nos ambientes, por meio destes dutos. Para isto foi usado o *software* FLUENT, com um modelo de turbulência de duas camadas (*two-layer turbulence model*), para garantir precisão na resolução das informações do escoamento na região próxima à parede, que é crítica para previsões precisas da convecção de calor. Uma solução segregada, através do algoritmo SIMPLE, foi aplicada para o acoplamento pressão-velocidade. Um esquema Upwind, de segunda ordem, foi adotado para a discretização das equações de governo. O critério de convergência, para todas as variáveis, foi definido em 10^{-4} , com exceção da energia, que foi 10^{-6} . A comparação entre os resultados das simulações numéricas e os da literatura mostraram que o modelo computacional desenvolvido pode prever o processo de convecção do calor com precisão satisfatória.

Bansal, Misra, Agrawal e Mathur (2009) analisam o desempenho térmico e a capacidade de aquecimento de sistemas, que definem como trocadores de calor solo-duto-ar (*earth-pipe-air heat exchanger* - EPAHE), no aquecimento de edificações no inverno. Os autores desenvolveram um modelo CFD, tendo como plataforma o programa de simulação FLUENT, cujos resultados foram validados por dados experimentais de uma investigação realizada em Ajmer, na Índia. O experimento constituiu-se de dois dutos horizontais, de 0,15 m de diâmetro interno, e comprimento de 23,42 m, um em PVC e o outro em aço carbono,

enterrados em solo seco, na profundidade de 2,7 m, pelos quais foi circulado ar em várias velocidades. Foram instalados seis termopares em cada duto, para monitoramento das temperaturas do ar. O principal objetivo do estudo CFD foi investigar o efeito do material constituinte dos dutos enterrados no desempenho do sistema EPAHE e, também, estudar o efeito da velocidade do ar neste desempenho. Os resultados simulados e os dados experimentais mostraram boa concordância. A mudança do material dos dutos não se mostrou significativa na distribuição de temperaturas do ar circulante. A velocidade do ar, através do duto, mostrou-se importante para o desempenho do sistema EPAHE. Conforme os dados experimentais, ao passar pelo duto, com velocidade de 2 m/s, o ar aqueceu 4,8 °C e, com velocidade de 5 m/s, aqueceu 4,1 °C.

Complementando estudo anterior, já apresentado no texto, no qual o foco foi o aquecimento de edificações no inverno, Bansal, Misra, Agrawal e Mathur (2010) continuam a analisar o desempenho térmico e a capacidade de aquecimento dos trocadores de calor solo-duto-ar, agora na situação de resfriamento das edificações, no verão. Seguindo os procedimentos e usando o mesmo experimento, os resultados simulados e os dados experimentais continuaram a mostrar boa concordância. Também neste caso, a mudança do material dos dutos não se mostrou significativa na distribuição de temperaturas do ar circulante. Também, neste caso, a velocidade do ar através do duto mostrou-se importante para o desempenho do sistema EPAHE. Conforme os dados experimentais, ao passar pelo duto, com velocidade de 2 m/s, o ar esfriou 12,7 °C e, com velocidade de 5 m/s, esfriou 8,0 °C.

3.2 REGIME TÉRMICO DO SOLO

O regime térmico das camadas mais superficiais de um solo é determinado pelo aquecimento ou resfriamento de sua superfície, em decorrência da incidência da radiação solar ou da emissão de radiação (ondas longas) para a atmosfera, respectivamente, e o consequente transporte, por condução, de calor sensível, para ou de seu interior. A difusão do calor decorre dos processos de transferência de energia, que se estabelecem em virtude do gradiente térmico existente entre as moléculas do solo. A constante interação entre elas, umas com as outras, é responsável pelo fluxo de energia, daquelas cujo nível de energia é mais alto, para aquelas em que é mais baixo. Se considerado o ciclo diário, durante o dia a superfície se aquece, gerando um fluxo de calor para o interior. À noite, o resfriamento da superfície, por emissão de radiação terrestre, inverte o sentido do fluxo, que passa a ser do interior do solo para a

superfície. O mesmo fenômeno ocorre se considerado o ciclo anual: durante o período quente, gera-se um fluxo de calor para o interior do solo e, no período frio, o fluxo de calor é no sentido contrário.

Este fluxo de calor depende, basicamente, das propriedades físicas do solo: massa específica, condutividade térmica, calor específico e a emissividade. Além disso, essa variação é afetada pela interação com outros fatores, como os fatores meteorológicos – irradiância solar global, temperatura do ar, nebulosidade, chuva e vento – e os fatores relacionados ao próprio solo – textura, estrutura, teor de matéria orgânica, relevo e o tipo de cobertura do terreno.

Na sequência se aborda o processo de transmissão de calor por condução, conforme Incoprera e DeWitt (1998), chegando-se a equação do calor, na sua forma mais geral, para então analisar a difusão do calor no solo, seguindo as bases teóricas conforme Mimoso (1987).

3.2.1 Equação geral do calor

O processo de transmissão de calor por condução em um meio, conforme a lei de Fourier, é determinado a partir do campo de temperaturas que se estabelece neste meio. O gradiente térmico, por sua vez, é função das condições impostas às fronteiras, e provoca transferência de energia entre as moléculas do meio. A equação (3.1) expressa a lei de Fourier, em sua forma diferencial, admitindo este meio isotrópico e com um perfil linear, para as variações de temperatura:

$$\vec{f} = -k \cdot \vec{\nabla}T \quad (3.1)$$

A densidade do fluxo de calor \vec{f} que atravessa o meio é, então, dada pelo produto da condutividade térmica (k) do meio e o gradiente de temperaturas ($\vec{\nabla}T$), o qual é definido, para o sistema de coordenadas cartesianas, como $\vec{\nabla}T = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \cdot \vec{e}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \vec{e}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \vec{e}_z \right)$.

O sinal negativo na equação (3.1) decorre do calor se transferir na direção da temperatura decrescente. O princípio da conservação da energia, aplicado a um volume finito V de superfície S , esquematizado na figura 3, requer que o acúmulo de energia térmica, por unidade de tempo, neste volume, seja igual ao fluxo que entra menos o fluxo que sai, acrescido do fluxo de energia gerado no volume, em virtude da conversão de outras formas de energia em calor.

Admitindo ser \vec{n} o versor normal ao elemento de superfície dS do volume V , o produto $(\vec{f} \cdot \vec{n}) \cdot dS$ representa o fluxo líquido de energia no elemento, ou seja, a diferença entre o fluxo que entra, com sinal negativo, dado que \vec{n} sai do volume, e o fluxo que sai, com sinal positivo, pela mesma razão.

$$\bar{q}_s - \bar{q}_e = \int_S (\vec{f} \cdot \vec{n}) \cdot dS \quad (3.2)$$

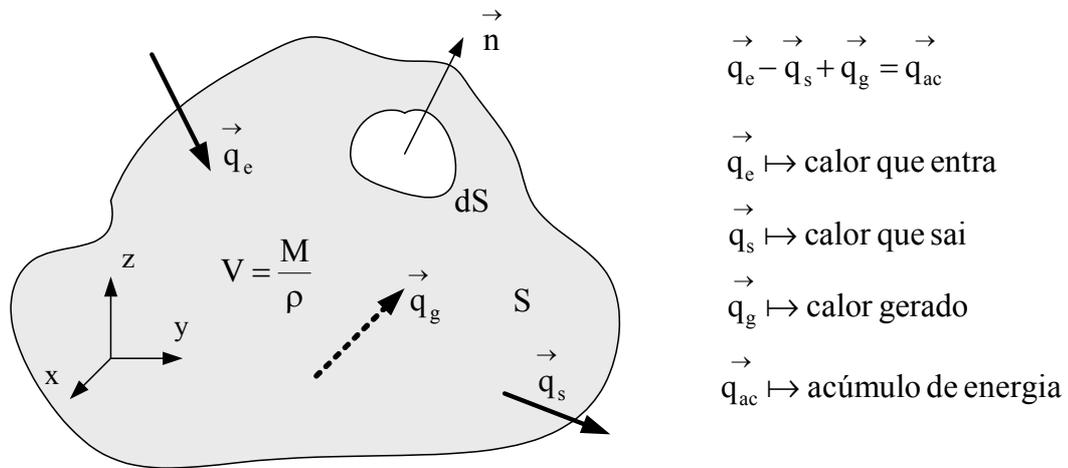


Figura 3: Volume finito para dedução da equação do calor

Usando o teorema da divergência de Gauss, a integração sobre a área S , na expressão (3.2), pode ser substituída por uma integração sobre o volume V , como a seguir:

$$\int_S (\vec{f} \cdot \vec{n}) \cdot dS = \int_V (\nabla \circ \vec{f}) \cdot dV \quad (3.3)$$

onde, $\nabla \circ \vec{f}$ é o divergente do fluxo de calor \vec{f} , dado por $\nabla \circ \vec{f} = \frac{\partial \vec{f}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{f}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{f}_z}{\partial z}$.

Havendo no meio uma fonte de energia, a geração pode ser representada em função de uma taxa de energia, \dot{q} , por unidade de volume. Para todo o volume, a energia gerada pode ser dada por:

$$\bar{q}_g = \int_V \dot{q} \, dx dy dz \quad (3.4)$$

Por outro lado, o acúmulo de energia no volume V , por unidade de tempo, correspondente à variação na temperatura, é proporcional ao calor específico c , do material do meio.

Considerando dm a massa do elemento, o acúmulo de energia é dado por $c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dm$. Mas

$dm = \rho \cdot dv$, onde ρ é a massa específica do material. Então, para todo o volume, a acumulação de energia, por unidade de tempo é:

$$\bar{q}_{ac} = \int_v \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dV \quad (3.5)$$

Como, pelo princípio da conservação da energia, $\bar{q}_e - \bar{q}_s + \bar{q}_g = \bar{q}_{ac}$, obtém-se a equação da difusão do calor no meio, como a seguir:

$$-\int_v (\nabla \circ \vec{f}) \cdot dV + \int_v \dot{q} \cdot dV = \int_v \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dV \quad (3.6)$$

A expressão (3.6) pode ser organizada numa forma mais conveniente para a análise da difusão do calor no meio, conforme a seguir:

$$\int_v \left[\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + (\nabla \circ \vec{f}) - \dot{q} \right] \cdot dV = 0 \quad (3.7)$$

Observando-se que o volume V é arbitrário na equação (3.7), a igualdade só pode ser válida se, para cada ponto do meio, verificar-se que:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + (\nabla \circ \vec{f}) - \dot{q} = 0 \quad (3.8)$$

Introduzindo na equação (3.8) a lei de Fourier, expressa pela equação (3.1), obtém-se a equação da difusão do calor:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot [\nabla \circ (\vec{\nabla} T)] + \dot{q} \quad (3.9)$$

onde $[\nabla \circ (\vec{\nabla} T)] = \nabla^2 T$ é o operador Laplaciano de T , dado por $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$.

Assim, a expressão (3.9) pode ser dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho \cdot c} \cdot \nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{\rho \cdot c} \quad (3.10)$$

A relação $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ define a difusividade térmica do material do meio. Em função de α , a equação (3.10) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (\alpha) \cdot \nabla^2 T + \left(\frac{\alpha}{k} \right) \cdot \dot{q} \quad (3.11)$$

A expressão (3.11) representa a equação do calor, na sua forma mais geral, sendo independente do sistema de coordenadas escolhido.

3.2.2 Difusão do calor no solo

O processo de difusão do calor no solo segue a equação geral do calor. Considerando o solo não modificado, ou seja, o solo em sua condição natural, sem a interferência de elementos que possam, de uma forma ou outra, alterar a distribuição natural de calor em seu interior e, também, que, neste processo, a estratificação do solo com a profundidade é significativamente maior que a estratificação lateral, bem como que os gradientes de temperatura e umidade se acentuam mais com a profundidade, do que em outras direções, o processo de difusão do calor neste meio pode ser aproximado a um regime variável unidirecional, com a profundidade sendo a coordenada relevante no equacionamento.

Considerando ainda não haver geração interna de calor e admitindo um comportamento do solo como um meio semi-infinito, tal qual ilustrado na figura 4, solicitado em sua superfície por ciclos periódicos de temperatura, do tipo noite/dia (ciclo diário) e inverno/verão (ciclo anual), o processo de condução de energia térmica que se estabelece pode ser aproximado a um regime variável unidirecional. Nestes termos, a equação (3.11) se reduz para:

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} \quad (3.12)$$

As condições de contorno, que definem as hipóteses para solução do problema são duas: uma referente à temperatura na superfície do solo e a outra, relativa à temperatura do solo profundo.

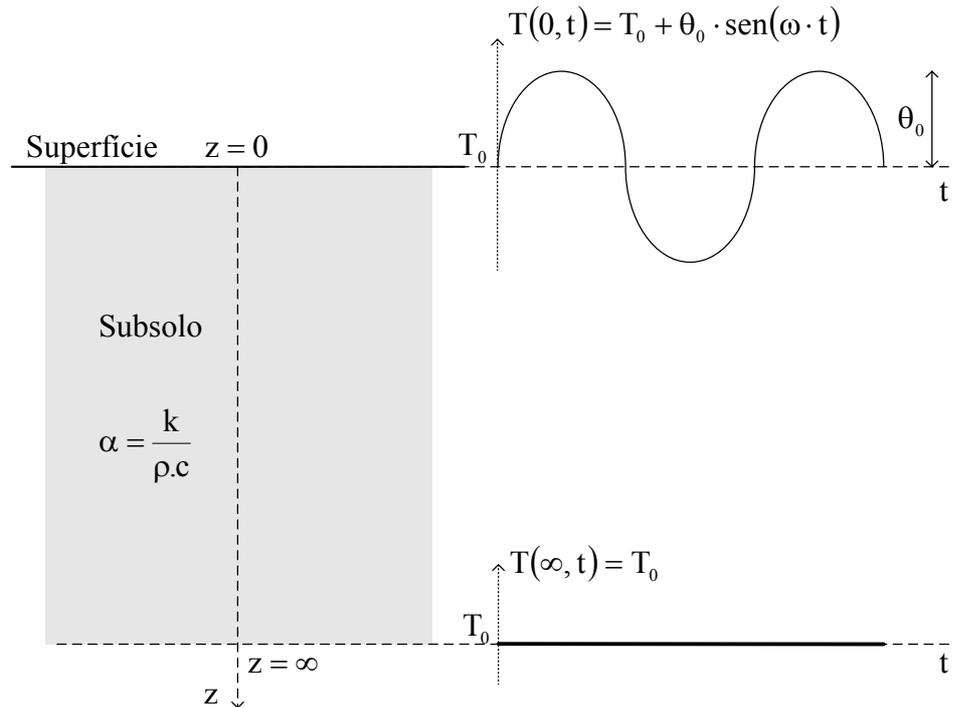


Figura 4: Solo semi-infinito

Na superfície, a temperatura do solo varia periodicamente, na forma senoidal, como expresso na equação (3.13), com valores em torno de um valor médio T_0 , amplitude θ_0 e período $\frac{2\pi}{\omega}$. O período, no modelo diário, tem valor igual a 24 horas e, no modelo anual, igual a 365 dias.

$$T(0, t) = T_0 + \theta_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (3.13)$$

Quando a profundidade tende para infinito, a amplitude da variação da temperatura torna-se nula e a temperatura fica constante e igual ao valor médio T_0 , como mostra a expressão (3.14).

$$T(\infty, t) = T_0 \quad (3.14)$$

Para simplificar a aplicação das condições de contorno na equação (3.12) é interessante fazer $\theta(z, t) = T(z, t) - T_0$, nas equações (3.13) e (3.14). A equação (3.12) e as condições de contorno (3.13) e (3.14) se transformam em:

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 \theta(z, t)}{\partial z^2} \quad (3.15)$$

$$\theta(0, t) = \theta_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (3.16)$$

$$\theta(\infty, t) = 0 \quad (3.17)$$

A hipótese para a solução é da separação de variáveis, ou seja, admite-se que a solução se constitui pelo produto de duas expressões: uma, função somente de z e outra, função somente de t :

$$\theta(z, t) = \phi(z) \cdot \tau(t) \quad (3.18)$$

Para substituir a equação (3.18) na (3.15) é necessário derivar $\theta(z, t)$ separadamente, em relação à profundidade z e ao tempo t :

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} = \phi \cdot \frac{d\tau(t)}{dt} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial^2 \theta(z, t)}{\partial z^2} = \tau \cdot \frac{d^2 \phi(z)}{dz^2} \quad (3.20)$$

Substituindo as equações (3.19) e (3.20) na (3.15) e organizando os termos, obtém-se uma expressão desacoplada para a difusão do calor, num solo homogêneo:

$$\frac{1}{\alpha \cdot \tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{\phi} \cdot \frac{d^2 \phi}{dz^2} \quad (3.21)$$

Sendo o meio isotrópico, a difusividade α é constante e o primeiro termo da expressão (3.21) é independente do segundo. Ambos os termos podem ser feitos iguais a uma constante C , gerando duas equações diferenciais ordinárias, homogêneas e de coeficientes constantes:

$$\frac{1}{\alpha \cdot \tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} = C \Rightarrow \frac{d\tau}{dt} - C \cdot \alpha \cdot \tau = 0 \Rightarrow \text{solução} \Rightarrow \tau = D \cdot e^{C\alpha t} \quad (3.22)$$

$$\frac{1}{\phi} \cdot \frac{d^2 \phi}{dz^2} = C \Rightarrow \frac{d^2 \phi}{dz^2} - C \cdot \phi = 0 \Rightarrow \text{solução} \Rightarrow \phi = A \cdot e^{\sqrt{Cz}} + B \cdot e^{-\sqrt{Cz}} \quad (3.23)$$

Substituindo as soluções das equações diferenciais ordinárias (3.22) e (3.23) em (3.18), obtém-se a solução da equação da difusão do calor no solo:

$$\theta(z, t) = D \cdot e^{C \cdot \alpha \cdot t} \left(A \cdot e^{\sqrt{C} \cdot z} + B \cdot e^{-\sqrt{C} \cdot z} \right) \quad (3.24)$$

Considerando que, para a superfície do solo, $z = 0$ e que a condição de contorno é dada pela equação (3.16), a equação (3.24) resulta em:

$$\theta_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) = D \cdot e^{C \cdot \alpha \cdot t} (A + B) \quad (3.25)$$

Na expressão (3.25) aparecem constantes de integração desconhecidas e que devem ser determinadas, em função das condições de contorno do problema. Na sequência são feitas hipóteses para determinação destas constantes.

1ª hipótese: $C = \text{real} \rightarrow$ a constante C real não satisfaz a equação (3.25), pois o segundo membro seria monotônico crescente ou decrescente com t , ou, ainda, constante para $C = 0$, enquanto o primeiro termo é periódico em t .

2ª hipótese: $C = a \pm i \cdot b \rightarrow$ substituindo C imaginário, na equação (3.25), resulta a expressão $\theta_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) = D \cdot e^{(a \pm i \cdot b) \alpha \cdot t} (A + B)$. Substituindo $e^{\pm i \cdot b \cdot \alpha \cdot t}$ por $\cos(b \cdot \alpha \cdot t) \pm i \cdot \text{sen}(b \cdot \alpha \cdot t)$ e reorganizando os termos obtém-se a expressão:

$$\theta_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) = D \cdot e^{a \cdot \alpha \cdot t} (\cos(b \cdot \alpha \cdot t) \pm \text{sen}(b \cdot \alpha \cdot t)) \cdot (A + B) \quad (3.26)$$

O segundo termo da expressão (3.26) é oscilatório, mas não é periódico, devido ao exponencial $e^{a \cdot \alpha \cdot t}$, que cresce ou decresce monotonicamente com o tempo, conforme o sinal da constante a . Para a expressão (3.26) ser consistente, o termo $e^{a \cdot \alpha \cdot t}$ deve ser constante e unitário, o que implica em $a = 0$. Então, a constante C só pode ser do tipo imaginário puro, $C = \pm i \cdot b$. Com isso, a equação (3.25) adquire a seguinte forma:

$$\theta_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) = D \cdot e^{\pm i \cdot b \cdot \alpha \cdot t} (A + B) \quad (3.27)$$

A expressão (3.27), numa análise preliminar, parece não ter solução, dado que se constitui de um termo real, que deve ser igual a outro, que é imaginário puro. No entanto, observa-se que representa duas soluções gerais para a equação da difusão do calor no solo, uma

correspondente ao sinal positivo do exponencial e, a outra, ao sinal negativo. Uma vez que a equação a resolver é linear, uma combinação linear dessas soluções também deverá ser solução da equação. Assim, a hipótese seguinte constitui-se em combinar linearmente estas soluções, numa forma conveniente ao cancelamento dos termos imaginários, quando da determinação das constantes de integração.

3ª hipótese: Voltando à equação (3.24) e fazendo $C = \pm i \cdot b = \pm i \cdot \lambda^2$, em que se adotou $b = \lambda^2$, com $\lambda > 0$, para simplificar a apresentação do termo \sqrt{C} , obtém-se as expressões que são as soluções gerais para a equação da difusão do calor no solo:

$$\theta_1 = D_1 \cdot e^{i \cdot \alpha \cdot \lambda^2 \cdot t} \left(A_1 \cdot e^{\sqrt{i} \cdot \lambda \cdot z} + B_1 \cdot e^{-\sqrt{i} \cdot \lambda \cdot z} \right) \quad (3.28)$$

$$\theta_2 = D_2 \cdot e^{-i \cdot \alpha \cdot \lambda^2 \cdot t} \left(A_2 \cdot e^{\sqrt{-i} \cdot \lambda \cdot z} + B_2 \cdot e^{-\sqrt{-i} \cdot \lambda \cdot z} \right) \quad (3.29)$$

Para determinar as constantes de integração, é necessário analisar os termos exponenciais, do tipo $e^{\pm \sqrt{\pm i} \cdot \lambda \cdot z}$, cujos expoentes se constituem de uma parte real e outra parte imaginária:

$$\sqrt{i} = \sqrt{\frac{i \cdot (1+i)^2}{(1+i)^2}} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i}{\sqrt{2}} \right) \quad \text{ou} \quad \sqrt{i} = \sqrt{\frac{i \cdot (-1-i)^2}{(-1-i)^2}} = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i}{\sqrt{2}} \right) \quad (3.30)$$

$$\sqrt{-i} = \sqrt{\frac{-i \cdot (-1+i)^2}{(-1+i)^2}} = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i}{\sqrt{2}} \right) \quad \text{ou} \quad \sqrt{-i} = \sqrt{\frac{i \cdot (1-i)^2}{(1-i)^2}} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i}{\sqrt{2}} \right) \quad (3.31)$$

Considerando as diversas hipóteses de substituição dos expoentes, verificam-se aquelas possíveis, tanto para θ_1 , como para θ_2 .

- Para o termo $e^{\sqrt{i} \cdot \lambda \cdot z}$ são duas as hipóteses:

$$\text{a) } \sqrt{i} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i}{\sqrt{2}} \right) \Rightarrow e^{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z} e^{\frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z}$$

$$\text{b) } \sqrt{i} = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i}{\sqrt{2}} \right) \Rightarrow e^{-\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z} e^{-\frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z}$$

Analisando as duas hipóteses é possível observar a hipótese (a), com expoentes positivos, inconsistente com a variação de temperatura no solo, visto que cresce monotonicamente com

z , como consequência do termo $e^{\lambda \cdot z / \sqrt{2}}$. Somente a hipótese (b), com expoentes negativos, é possível.

- A exemplo do caso anterior, para o termo $e^{-\sqrt{i} \cdot \lambda \cdot z}$ são duas as hipóteses. A análise é semelhante, trocando apenas os sinais. Somente a hipótese que tem os expoentes negativos é possível.

- Para o termo $e^{\sqrt{-i} \cdot \lambda \cdot z}$ também são duas as hipóteses:

$$\text{a) } \sqrt{-i} = \left(-1/\sqrt{2} + i/\sqrt{2}\right) \Rightarrow e^{\frac{-1}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z} e^{\frac{i}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z}$$

$$\text{b) } \sqrt{i} = \left(1/\sqrt{2} - i/\sqrt{2}\right) \Rightarrow e^{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z} e^{\frac{-i}{\sqrt{2}} \cdot \lambda \cdot z}$$

Fazendo o mesmo tipo de análise, é possível observar agora a hipótese (b) inconsistente com a variação de temperatura no solo, visto que cresce monotonicamente com z , devido ao termo $e^{\lambda \cdot z / \sqrt{2}}$. Assim, somente a segunda hipótese (a), que tem o expoente do termo real negativo, é possível.

- Seguindo o caso anterior, para o termo $e^{-\sqrt{-i} \cdot \lambda \cdot z}$ também são duas as hipóteses e somente aquela que tem o expoente do termo real negativo é possível.

Descartando as hipóteses que não são possíveis, as soluções θ_1 e θ_2 , indicadas pelas expressões (3.28) e (3.29), ficam como a seguir:

$$\theta_1 = D_1 \cdot e^{i \cdot \alpha \cdot \lambda^2 \cdot t} \left(A_1 \cdot e^{\left(\frac{-1-i}{\sqrt{2}}\right) \cdot \lambda \cdot z} + B_1 \cdot e^{\left(\frac{-1+i}{\sqrt{2}}\right) \cdot \lambda \cdot z} \right) \quad (3.32)$$

$$\theta_2 = D_2 \cdot e^{-i \cdot \alpha \cdot \lambda^2 \cdot t} \left(A_2 \cdot e^{\left(\frac{-1+i}{\sqrt{2}}\right) \cdot \lambda \cdot z} + B_2 \cdot e^{\left(\frac{-1-i}{\sqrt{2}}\right) \cdot \lambda \cdot z} \right) \quad (3.33)$$

A solução proposta, de combinar linearmente as soluções dadas por θ_1 e θ_2 , será então colocada na forma de $\theta = \theta_1 + \theta_2$:

$$\theta = e^{\frac{-\lambda \cdot z}{\sqrt{2}}} \left[D_1 \cdot (A_1 + B_1) \cdot e^{i \left(\alpha \cdot \lambda^2 \cdot t - \frac{\lambda \cdot z}{\sqrt{2}} \right)} + D_2 \cdot (A_2 + B_2) \cdot e^{-i \left(\alpha \cdot \lambda^2 \cdot t - \frac{\lambda \cdot z}{\sqrt{2}} \right)} \right] \quad (3.34)$$

Lembrando que $e^{\pm i \cdot \delta} = \cos(\delta) \pm i \cdot \sin(\delta)$ e substituindo as constantes da expressão (3.34) por $K_1 = D_1 \cdot (A_1 + B_1)$, $K_2 = D_2 \cdot (A_2 + B_2)$ e $\delta = \alpha \cdot \lambda^2 \cdot t - \frac{\lambda \cdot z}{\sqrt{2}}$ obtém-se:

$$\theta = e^{\frac{-\lambda \cdot z}{\sqrt{2}}} \left[K_1 \cdot \cos(\delta) + i \cdot K_1 \cdot \sin(\delta) + K_2 \cdot \cos(\delta) - i \cdot K_2 \cdot \sin(\delta) \right] \quad (3.35)$$

Reorganizando a expressão (3.35) e fazendo novas substituições nas constantes $G = K_1 + K_2$ e $F = i \cdot (K_1 - K_2)$, chega-se à solução da equação da difusão do calor no solo, como a seguir, onde G e F são constantes a determinar, em função das condições de contorno existentes:

$$\theta = e^{\frac{-\lambda \cdot z}{\sqrt{2}}} \left[G \cdot \cos(\delta) + F \cdot \sin(\delta) \right] \quad (3.36)$$

A partir das condições de contorno definidas para a superfície do solo, equação (3.16), e para uma profundidade grande no solo, dada em (3.17), é possível determinar as constantes de integração na expressão (3.36):

$$\text{a) } z = 0 \quad \Rightarrow \quad \theta = \theta(0, t) = \theta_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$\theta_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) = G \cdot \cos(\delta) + F \cdot \sin(\delta) \quad \Rightarrow \quad G = 0 \quad \Rightarrow \quad F = \theta_0 \quad \Rightarrow \quad \delta = (\omega \cdot t)$$

$$\delta = \alpha \cdot \lambda^2 \cdot t - \frac{\lambda \cdot z}{\sqrt{2}} \quad \Rightarrow \quad \delta = \alpha \cdot \lambda^2 \cdot t = (\omega \cdot t) \quad \Rightarrow \quad \lambda = \sqrt{\frac{\omega}{\alpha}}$$

$$\text{b) } z = \infty \quad \Rightarrow \quad \theta = \theta(\infty, t) = 0 \quad \Rightarrow \quad e^{\frac{-\lambda \cdot z}{\sqrt{2}}} = 0$$

Retomando a troca de variáveis definida no início como $T(z, t) = T_0 + \theta(z, t)$, finalmente pode-se obter a solução da equação (3.21), que regula a difusão do calor no solo:

$$T(z, t) = T_0 + \theta_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z} \left[\sin \left((\omega \cdot t) - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z \right) \right] \quad (3.37)$$

A equação (3.37) mostra que a variação de temperatura na superfície se propaga através do solo. Com a profundidade, as ondas senoidais mantêm a frequência da variação na superfície, mas diminuem de amplitude e se defasam no tempo, conforme ilustra a figura 5.

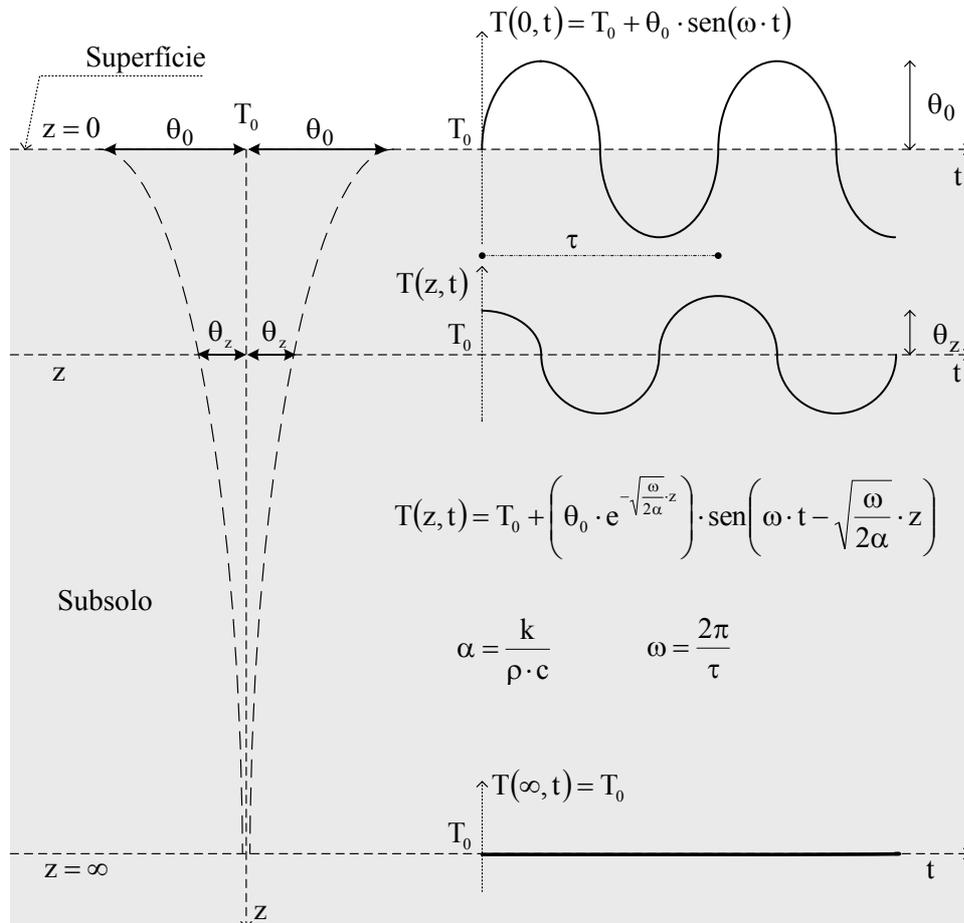


Figura 5: Temperaturas no solo

A variação de temperatura é exponencial com a profundidade e senoidal com o tempo. Na superfície, a distribuição segue a função $\text{sen}(\omega \cdot t)$ e, a uma profundidade qualquer, z varia com a função $\text{sen} \left((\omega \cdot t) - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z \right)$. Existe uma defasagem ϕ entre as ondas na superfície e na profundidade z , dada por:

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \alpha \cdot \omega}} \cdot z \quad (3.38)$$

A análise da variação na densidade do fluxo de calor, tanto na superfície, como em qualquer profundidade do solo, em decorrência dos gradientes térmicos que se estabelecem, é determinada pela equação (3.1), simplificada como a seguir, para a condição de condução unidirecional do calor:

$$f_z = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.39)$$

Derivando a equação (3.37) em relação à profundidade z e substituindo na expressão (3.39), obtém-se a expressão do fluxo térmico no solo, em função da profundidade e do tempo:

$$f_z = k \cdot \theta_0 \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z} \cdot \left[\cos\left(\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z\right) + \text{sen}\left(\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z\right) \right] \quad (3.40)$$

A equação (3.40) pode ser reorganizada pelo uso da relação trigonométrica da adição de ângulos, na qual: $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [\cos(\omega \cdot t) + \text{sen}(\omega \cdot t)] = \text{sen}\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{4}\right)$. O fluxo térmico, então, é dado por:

$$f_z = k \cdot \theta_0 \cdot \sqrt{\frac{\omega}{\alpha}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z} \cdot \left[\text{sen}\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (3.41)$$

Da equação (3.41) é possível observar que, para a superfície do solo, fazendo $z = 0$, o fluxo térmico se dirige alternadamente para dentro e para fora da superfície, com a mesma frequência e defasado em relação à variação da distribuição da temperatura. A defasagem entre os eventos de temperatura e do fluxo térmico é dada por $-\frac{\pi}{4 \cdot \omega}$.

$$f_z = k \cdot \theta_0 \cdot \sqrt{\frac{\omega}{\alpha}} \cdot \left[\text{sen}\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (3.42)$$

Para uma profundidade z , qualquer, o fluxo de calor sempre acontece na direção da temperatura decrescente. A figura 6 ilustra a variação do fluxo térmico com a profundidade no solo, para um dado tempo t da distribuição.

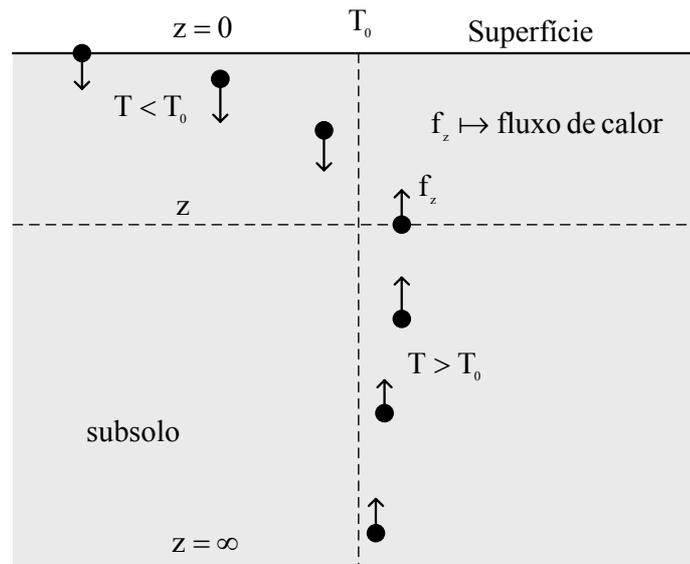


Figura 6: Fluxo de calor no solo

A consideração do solo como um meio semi-infinito, para análise dos gradientes térmicos decorrentes das variações periódicas de temperaturas, características dos ciclos diários ou anuais, pode ser agora avaliada em termos da onda térmica, dada pela equação (3.37). Admitindo que variações de temperatura com amplitude igual a uma fração η (por exemplo, $\eta = 1\%$) da amplitude inicial caracterizam um limite, a partir do qual os gradientes térmicos não são importantes e podem ser desconsiderados, determina-se a profundidade mínima, $z = l_{\min}$, requerida para o solo, a fim de que a teoria desenvolvida seja aplicável. Sabendo-se que a amplitude da onda de temperaturas é dada pela expressão,

$$\Theta = \theta_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \cdot z} \quad (3.43)$$

então, a profundidade l_{\min} , na qual a amplitude estará reduzida a uma fração η da amplitude inicial é dada por:

$$l_{\min} = -\sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\omega}} \cdot \ln \eta \quad (3.44)$$

3.2.3 Equações da difusividade térmica do solo

Usando a equação (3.43), é possível relacionar as amplitudes térmicas em profundidades diferentes, com o objetivo de estabelecer uma expressão para avaliar a difusividade térmica α do solo:

$$\frac{\Theta_1}{\Theta_2} = e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot (z_2 - z_1)} \quad \rightarrow \quad \ln \left(\frac{\Theta_1}{\Theta_2} \right) = -\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot (z_2 - z_1)$$

$$\alpha = \left(\frac{\omega}{2} \right) \cdot \left[\frac{z_2 - z_1}{\ln \left(\frac{\Theta_1}{\Theta_2} \right)} \right]^2 \quad \rightarrow \quad \text{equação da amplitude} \quad (3.45)$$

A expressão (3.45), conhecida como a equação da amplitude, permite estimar a difusividade térmica α do solo, a partir da medição da amplitude da onda térmica (diária ou anual), em profundidades diferentes.

Alternativamente, analisando o tempo para as variações de temperatura, observa-se, da expressão (3.37), que um ponto de máximo de temperatura, num ciclo (diário ou anual) ocorre quando,

$$\text{sen} \left[\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z \right] = 1 \quad \rightarrow \quad \omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z = \frac{\pi}{2}$$

ou seja, quando o tempo atingir o valor dado pela expressão a seguir:

$$t_{\max} = \left(\frac{\pi}{2 \cdot \omega} + \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \alpha \cdot \omega}} \cdot z \right) \quad (3.46)$$

Aplicando à expressão (3.46) as profundidades z_1 e z_2 e subtraindo os tempos, obtém-se a variação entre máximos, Δt_{\max} , como a seguir:

$$\Delta t_{\max} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \alpha \cdot \omega}} (z_2 - z_1) \quad (3.47)$$

A expressão (3.47), conhecida como equação da fase, mostra que a defasagem da temperatura máxima no solo aumenta com a profundidade e, também, possibilita a avaliação da

difusividade α , desde que se disponha de registros de tempos entre máximos de temperaturas, em diferentes profundidades no solo:

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot \omega} \left(\frac{z_2 - z_1}{\Delta t_{\max}} \right)^2 \rightarrow \text{equação da fase} \quad (3.48)$$

3.3 FUNDAMENTOS DA ABORDAGEM COMPUTACIONAL

De acordo com Maliska (2004), em consequência do desenvolvimento dos computadores de alta velocidade e da grande capacidade de processamento e armazenamento, o uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos de engenharia cresceu significativamente nos últimos anos. Essa disponibilidade, ao mesmo tempo em que possibilitou o desenvolvimento e refinamento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas, aumentou significativamente o interesse de novos pesquisadores e usuários pela simulação numérica, dada a simplicidade, versatilidade e generalidade que se estabeleceu no uso desta ferramenta.

Segundo Ferziger e Peric (1997), para obter a solução numericamente aproximada de um problema é necessário usar um método de discretização, que aproxime suas equações diferenciais, por meio de um sistema de equações algébricas, que possa ser resolvido computacionalmente. As aproximações são aplicadas a pequenos domínios discretizados no espaço e/ou no tempo e, então, a solução numérica gera resultados válidos nestas localizações discretas, no espaço e/ou no tempo. Assim, da mesma forma que numa análise experimental, os resultados dependem da qualidade dos equipamentos utilizados, na análise numérica, a precisão da solução é dependente da qualidade da discretização usada.

Versteeg e Malalasekera (1999) afirmam que a análise de sistemas, através de simulações computacionais, envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e demais fenômenos associados, é conhecida como Dinâmica de Fluidos Computacional – *Computational Fluid Dynamics* – ou simplesmente CFD. A aplicação de pacotes comerciais de CFD pressupõe vantagens, entre as quais se destacam: a redução substancial de tempo e de custo em novos projetos; a capacidade em estudar sistemas onde análises experimentais são complexas ou mesmo impossíveis; e o nível praticamente ilimitado de detalhamento nos resultados.

De maneira geral, estes códigos computacionais apresentam interfaces sofisticadas aos usuários, facilitando a definição do problema e a análise dos resultados. Normalmente, são divididos em três etapas principais: o pré-processamento, a solução (processamento) e o pós-processamento.

O pré-processamento é a etapa inicial, a qual consiste na introdução dos dados do problema no programa e na subsequente transformação destas informações em uma forma adequada para a solução do mesmo. É nesta etapa que se define a geometria da região de interesse (domínio computacional), divide-se o domínio em um número finito de subdomínios (geração da malha), seleciona-se a abrangência do fenômeno que será modelado, que se definem as propriedades do fluido e se aplicam as condições de contorno e iniciais (em problemas transientes) apropriadas.

Conforme Maliska (2004) e Versteeg e Malalasekera (1999), para a segunda etapa é possível destacar três métodos tradicionais de solução numérica das equações diferenciais parciais do problema: o Método de Diferenças Finitas (MDF), o Método de Volumes Finitos (MVF) e o Método de Elementos Finitos (MEF). A diferença entre estes métodos está relacionada com a maneira como as variáveis do escoamento são aproximadas e com o processo de discretização empregado.

Finalmente, Versteeg e Malalasekera (1999) indicam que na terceira etapa, de pós-processamento, os pacotes de CFD, como já referido, estão equipados com ferramentas sofisticadas, que possibilitam a visualização dos resultados.

Nesta pesquisa foram usados os *softwares* GAMBIT (pré-processamento) e FLUENT (pré-processamento, solução e pós-processamento). Estes *softwares* possibilitaram a solução numérica transiente do modelo matemático, formulado para a determinação da distribuição de temperatura do ar, que circula nos trocadores de calor solo-ar e do solo, no entorno deles.

O GAMBIT é um programa computacional, que auxilia na construção e discretização de modelos para CFD e outras aplicações. Tem a capacidade de tornar mais simples e intuitivas as etapas de construção (geometria), discretização (geração da malha) e definição dos diferentes tipos de regiões do modelo, sendo versátil para tratar uma ampla variedade de modelos (FLUENT 6.3).

O FLUENT, por sua vez, também é um programa computacional, baseado no MVF, e permite a modelagem de escoamentos de fluidos e de transferências de calor em domínios computacionais complexos, apresentando flexibilidade de malha e incluindo a capacidade de resolver problemas de escoamento, usando malhas não estruturadas. É um código compatível com malhas do tipo bidimensional (triângulo/quadrilátero) e tridimensional (tetraedro/hexaedro/pirâmide/híbridas) (FLUENT 6.3).

O MVF, como referido anteriormente, é um dos métodos usados para se obter a versão discreta das Equações Diferenciais Parciais (EDPs), que regem um dado problema. De acordo com Bortoli (2000) e Fortuna (2000), este método fundamenta-se em uma abordagem física do problema representado pelas EDPs e o seu desenvolvimento está baseado no conceito de fluxo entre regiões, o qual permite avaliar o fluxo entre volumes discretos adjacentes. O fluxo de uma determinada grandeza, como por exemplo, massa ou energia, é a quantidade dessa grandeza que atravessa a área de uma fronteira. A quantidade líquida desta grandeza, que atravessa um volume de controle, por unidade de tempo, é calculada pela integração, sobre suas fronteiras, da diferença entre os fluxos que entram e os que saem deste volume. O MVF sistematiza e generaliza o processo pela integração das EDPs, correspondentes a todos os volumes discretizados.

Maliska (2004) afirma ainda que, no contexto comercial dos pacotes de CFD, aqueles que usam o MVF são os de maior interesse. Esta preferência decorre da robustez do método, a qual é consequência das suas características conservativas. Em escoamentos de fluidos é importante satisfazer os princípios de conservação de quantidades, em cada ponto do domínio, visto que se busca a solução da EDP que rege o problema. A conservação de quantidades, em nível dos volumes finitos discretizados, garante o não aparecimento de gerações/sumidouros destas quantidades, como por exemplo, massa, quantidade de movimento e energia, no interior do domínio de cálculo.

Para analisar o movimento de fluidos, como a maioria dos modelos matemáticos, o FLUENT segue os princípios da conservação, os quais representam preceitos físicos para garantir a integridade das grandezas ao longo do processo. O *software* pressupõe a conservação da massa, expressa pela equação da continuidade, e a conservação da quantidade de movimento do fluido, representada pelas equações de Navier-Stokes. Para escoamentos envolvendo transferência de calor ou compressibilidade, uma equação adicional para a conservação da energia é resolvida, e equações adicionais de transporte são também resolvidas, quando o

escoamento é turbulento. Neste último caso as equações são necessárias para tornar possível a solução do problema do fechamento, o qual ocorre pela presença de novas variáveis na formulação matemática (flutuações dos campos de velocidades e temperaturas médios no tempo) e a manutenção do mesmo número de equações. Assim, são necessárias novas equações de transporte para modelar essas incógnitas.

3.3.1 Conservação da massa

A equação de conservação da massa, ou equação da continuidade, pode ser escrita, em sua forma mais geral, válida tanto para escoamentos compressíveis, como incompressíveis, pela expressão a seguir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.49)$$

na qual ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3) e \vec{v} é o vetor velocidade do escoamento (m/s). O termo fonte S_m ($\text{kg/m}^3\text{s}$) é a massa adicionada ou retirada à fase contínua pela segunda fase dispersa ou qualquer outra fonte.

3.3.2 Conservação da quantidade de movimento

A conservação da quantidade de movimento em um sistema de referência inercial (não acelerado) é descrita pela equação a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.50)$$

na qual ρ , é a massa específica do fluido (kg/m^3); \vec{v} , é o vetor velocidade do escoamento (m/s); p , a pressão estática do fluido (N/m^2); $\rho \vec{g}$, é a força de corpo gravitacional, por unidade de volume (N/m^3); \vec{F} , representa as forças de corpo externas, por unidade de volume, (N/m^3); e $\bar{\tau}$, é o tensor de tensões viscosas relacionadas às forças de superfície em um elemento infinitesimal de fluido (N/m^2), que é definido por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I} \right] \quad (3.51)$$

sendo μ , a viscosidade molecular (kg/ms); e \mathbf{I} , um tensor unitário. O segundo termo do lado direito apresenta as tensões desviadoras e estão relacionados com a dilatação volumétrica do

fluido; portanto, em escoamentos completamente incompressíveis este termo pode ser negligenciado.

3.3.3 Conservação da energia

A equação da conservação de energia é descrita pela equação (3.52), na qual os termos do lado esquerdo correspondem à variação local de energia e ao transporte advectivo de energia, respectivamente. Os três primeiros termos do lado direito representam a transferência de energia, devido à difusão de calor, difusão de massa e dissipação viscosa, respectivamente. O último termo, S_h (W/m^3) permite considerar, no modelo, qualquer fonte ou sumidouro de calor.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla[\bar{v}(\rho E) + p] = \nabla \left[k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \bar{v}) \right] + S_h \quad (3.52)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (3.53)$$

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (3.54)$$

$$h_j = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,j} dT \quad (3.55)$$

onde ρ , é a massa específica do fluido (kg/m^3); \bar{v} , é o vetor velocidade do escoamento (m/s); e p , a pressão estática do fluido (N/m^2). E , é a energia específica (J/kg), definida conforme a equação (3.53), na qual h , é a entalpia sensível (J/kg), dada pela equação (3.54). Nesta equação, Y_j e h_j , são a fração de massa e a entalpia da espécie j , respectivamente. Na equação (3.55), $c_{p,j}$, é o calor específico da espécie j (J/kgK); e T_{ref} , é uma temperatura em um estado termodinâmico de referência ($T_{\text{ref}} = 298,15K$). A condutividade efetiva, k_{eff} , (W/mK) é dada por $k + k_t$. Onde k_t , é a condutividade térmica turbulenta, definida de acordo com o modelo de turbulência adotado; e \bar{J}_j , é o fluxo difusivo da espécie j (kg/m^3s).

3.3.4 Modelagem da turbulência

Conforme Deschamps (2002), as equações de Navier-Stokes, associadas à equação da conservação da energia, permitem a descrição rigorosa dos escoamentos turbulentos, com transferência de calor por convecção. Entretanto, por definição, o escoamento turbulento é sempre tridimensional e transiente, requerendo níveis de discretizações espacial e temporal extremamente elevados para suas corretas caracterizações. Além disso, quando tais equações são resolvidas diretamente, empregando-se Simulação Numérica Direta (DNS – *Direct Numerical Simulation*), são necessários esquemas numéricos de alta ordem, o que aumenta demasiadamente o esforço computacional. Devido às dificuldades supracitadas, para a simulação numérica dos escoamentos têm sido usados modelos de turbulência validados experimentalmente, nos quais o nível de precisão depende, essencialmente, da validade das hipóteses utilizadas.

Neste estudo, para a simulação da distribuição de temperaturas do ar em escoamento nos trocadores de calor solo-ar e no solo, ao entorno deles, foi utilizado um destes modelos, que se encontra disponível no FLUENT: o *Reynolds Stress Model* (RSM), também conhecido como modelo do transporte das tensões de Reynolds.

Segundo Wilcox (2002), o modelo do transporte das tensões de Reynolds (RSM) pertence ao grupo dos modelos clássicos de turbulência. Estes modelos são conhecidos como média temporal de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e propõem realizar uma média temporal sobre as equações de conservação, que modelam os escoamentos, sendo as variáveis do problema (velocidade, pressão e temperatura) decompostas em uma parcela média e outra flutuante no tempo.

Os modelos de turbulência se distinguem, ainda, por serem dependentes ou independentes do conceito de viscosidade turbulenta de Boussinesq. Em ambos os casos é necessário obter equações de transporte adicionais, ou para o cálculo da viscosidade turbulenta, ou para o cálculo das tensões de Reynolds.

O modelo do transporte das tensões de Reynolds (RSM) é um modelo que independe da hipótese de Boussinesq. De acordo com Deschamps (2002) e Wilcox (2002), este modelo apresenta um comportamento mais universal, modelando, naturalmente, efeitos de curvaturas nas linhas de corrente, mudanças rápidas na taxa de deformação e escoamentos secundários. No entanto, este modelo impõe uma dificuldade maior para a convergência numérica da

solução e também requer um tempo de processamento maior que os modelos dependentes da viscosidade turbulenta.

O RSM soluciona o problema do fechamento das equações de Navier-Stokes, filtradas temporalmente, através da equação de transporte para a tensão de Reynolds, associada à equação para a taxa de dissipação da energia. A tensão de Reynolds é definida como a tensão exercida no fluido pelas flutuações turbulentas. Esta consideração do RSM implica que cinco equações adicionais de transporte devem ser resolvidas em um modelo bidimensional e sete equações adicionais de transporte devem ser resolvidas em um modelo tridimensional.

Deschamps (2002) assegura que o RSM considera de uma maneira bastante rigorosa, os efeitos de curvatura das linhas de corrente do escoamento (vórtices) e de alterações rápidas da taxa de deformação do fluxo; por isto, apresenta grande potencial para tratar de escoamentos complexos. Além disso, este modelo tem permitido a interpretação física de escoamentos submetidos a forças de campo.

A equação de transporte para a tensão de Reynolds, definida como $\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j})$, é expressa por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j}) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \phi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S_u \quad (3.56)$$

onde C_{ij} , representa o transporte advectivo das tensões de Reynolds, sendo dado por:

$$C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) \quad (3.57)$$

$D_{T,ij}$, representa o fenômeno da difusão turbulenta das tensões de Reynolds, definida por:

$$D_{T,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)} \right] \quad (3.58)$$

$D_{L,ij}$, representa o fenômeno da difusão molecular das tensões de Reynolds, expressa por:

$$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] \quad (3.59)$$

P_{ij} , representa a taxa de criação das tensões de Reynolds pela ação do escoamento médio sobre o campo turbulento, dada por:

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (3.60)$$

G_{ij} , indica a produção das tensões de Reynolds relacionadas a flutuações de forças de campo (neste caso empuxo), definida por:

$$G_{ij} = -\rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta}) \quad (3.61)$$

ϕ_{ij} , é a pressão de deformação, expressa por:

$$\phi_{ij} = p \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} \quad (3.62)$$

ε_{ij} , representa a taxa de dissipação das tensões de Reynolds pela ação viscosa, dada por:

$$\varepsilon_{ij} = 2\mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \quad (3.63)$$

F_{ij} , indica a geração devido a rotação do sistema, definida por:

$$F_{ij} = -2\rho \Omega_k \left(\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm} \right) \quad (3.64)$$

e, finalmente, S_u é o termo fonte definido pelo usuário.

Dos vários termos da equação (3.56), C_{ij} , $D_{L,ij}$, P_{ij} e F_{ij} não necessitam ser modelados.

Entretanto, $D_{T,ij}$, G_{ij} , ϕ_{ij} e ε_{ij} precisam ser modelados, para completar o sistema de equações.

Uma discussão detalhada sobre os modelos de turbulência, suas aplicações a diversos escoamentos de base, equacionamentos das equações de transporte adicionais e obtenção dos parâmetros de fechamento destas equações são descritos, de forma mais específica, em Wilcox (2002) e Deschamps (2002).

3.3.5 Acoplamento pressão-velocidade

O acoplamento entre a pressão e a velocidade causa dificuldades para solução do sistema de equações que rege o escoamento. Esta solução é obtida a partir de uma condição adicional, compatível com o estabelecimento de um campo de velocidade, que satisfaça e reformule a equação da continuidade. O FLUENT disponibiliza cinco algoritmos de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE, SIMPLEC, PISO, *Coupled* e *Fractional Step*. Todos utilizam o modelo de solução segregado para os sistemas de equações, que devem ser resolvidos, com exceção do esquema *Coupled*, que utiliza o modelo de solução acoplado.

Maliska (2004) explica que a solução segregada dos sistemas de equações resolve os sistemas lineares, um a um, atualizando os coeficientes. Já, a solução acoplada dos sistemas de equações algébricas cria uma única matriz, envolvendo todos os coeficientes e resolvendo todas as incógnitas, simultaneamente.

Neste trabalho foi utilizado o esquema de solução *Coupled*. O esquema de solução acoplado oferece algumas vantagens, com relação ao esquema não-acoplado ou segregado. O esquema acoplado obtém uma implementação robusta e eficiente para escoamentos permanentes, com desempenho superior, se comparado aos esquemas de solução segregados. Para escoamentos transientes, sua utilização é indicada quando a qualidade da malha é baixa ou quando são empregados grandes passos de tempo (FLUENT 6.3).

4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

4.1 ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS NA PESQUISA

Ao abordar a transferência de calor e a mecânica dos fluidos, usando métodos computacionais, Maliska (2004) refere que, basicamente, são três as ferramentas disponíveis e complementares para o desenvolvimento de projetos ou análises de problemas em engenharia: os métodos analíticos; os métodos numéricos computacionais (experimentação numérica); e os métodos experimentais, em laboratórios ou em ambiente de campo. Nesta pesquisa, pela forma com que se estruturou a definição de seus objetivos, que ocorreu ao longo de seu processo de execução, foram usados todos estes três instrumentos de análise.

Conforme o autor, os métodos analíticos buscam resolver as equações diferenciais, que regem os sistemas ou modelos matemáticos analisados de forma fechada. Entretanto, estas equações, muitas vezes, são demasiado complexas e para se tornarem tratáveis analiticamente são alteradas, a partir de hipóteses simplificadoras, admitidas como possíveis, frente aos fenômenos físicos que envolvem. As soluções assim obtidas são aproximadas e necessitam passar por procedimentos de validação, realizados a partir de comparações dos resultados, obtidos de um banco de dados, oriundo de experimentações ou experiências anteriores.

Por outro lado, refere o autor, que os casos mais complexos de desenvolvimento de processos e equipamentos em engenharia, que envolvem fenômenos não lineares, com condições de contorno gerais, definidos em geometrias também complexas, não têm solução analítica e a alternativa são os métodos numéricos. Estes métodos subtendem habilidades na formulação matemática dos modelos disponíveis, na definição de suas condições de aplicabilidade e na busca da convergência das soluções que se pretende. Eles simulam numericamente os problemas, produzindo resultados com relativa rapidez, mas também aproximados, que podem ser mais ou menos refinados, à custa de esforços computacionais.

Recomenda ainda o autor, que as soluções analíticas, sempre que possível, devem servir como referência. A obtenção da solução, em forma fechada, requer baixíssimos tempos de computação e pode validar casos limites de modelos numéricos e auxiliar no desenvolvimento de métodos numéricos mais robustos. Se um método analítico for suficiente para resolver o problema de interesse, dentro dos níveis de precisão e exigência necessários, ele deve ser preferido, pois a regra básica, que deve ser sempre observada em engenharia, é o uso da ferramenta adequada ao tamanho do problema que se quer resolver.

A experimentação, por sua vez, segundo o autor, seja em laboratório ou em ambiente de campo, constitui-se na base do conhecimento empírico de problemas reais. As condições específicas para o experimento são construídas em laboratório, no caso da experimentação, e apenas reproduzidas, no caso de experimentação em ambiente de campo. Muitas vezes, a experimentação tem o inconveniente do custo elevado e, em outras, da impossibilidade de ser realizada tal como deveria, por várias questões, entre elas a falta de segurança ou a dificuldade de reprodução das condições reais. Na falta de modelos matemáticos estabelecidos e nos casos de geometrias extremamente complexas, entretanto, pode ser a única alternativa disponível ao projetista.

É conforme, para o autor, que o desenvolvimento de projetos ou análise de problemas em engenharia, atualmente, passe pelo uso da simulação numérica, como ferramenta calibrada, a partir do conhecimento empírico obtido de métodos experimentais. A união dessas técnicas reduz o tempo do processo e potencializa melhores resultados e o menor custo.

Neste contexto existem, conforme Maliska (2004), dois níveis de erros, que podem estar presentes no processo de solução numérica, quando o resultado é comparado com o problema físico real: no **primeiro nível** estão os erros numéricos, propriamente ditos, advindos da má solução das equações diferenciais. Para detectá-los, o resultado deve ser comparado com outras soluções, analíticas ou numéricas, para verificar se a equação diferencial foi corretamente resolvida. Nesta comparação, chamada de validação numérica, atesta-se a qualidade do método; no **segundo nível** estão os erros resultantes do uso de equações diferenciais, que não representam adequadamente o fenômeno. Nesta comparação, chamada de validação física, atesta-se a fidelidade do modelo matemático para com o problema físico. Assim, uma ferramenta numérica é adequada e confiável quando se consegue, simultaneamente, **um método numérico**, que resolva corretamente as equações diferenciais e **um modelo matemático**, que represente com fidelidade o fenômeno físico. A comparação do

resultado numérico com o resultado analítico, se existir, ou com outros resultados numéricos, caracteriza a validação numérica. Por outro lado, a comparação do resultado numérico com o resultado experimental identifica a validação física.

Para ilustrar a abrangência deste estudo, as três ferramentas de análise, referidas anteriormente, são usadas em suas diversas etapas. No sub-capítulo 5.1, destaca-se o uso da equação da difusão do calor no solo e dados de temperatura do solo, obtidos de um banco de dados da Fundação Estadual de Apoio a Pesquisa – FEPAGRO, para avaliar a difusividade térmica do solo. Já, no sub-capítulo 5.7, esta mesma equação foi aplicada para, a partir dos dados de temperatura do solo, monitorados na pesquisa, estabelecer temperaturas previstas para o solo, no local da pesquisa, em função do tempo e da profundidade. No capítulo 6, foi a vez da simulação numérica, usada para prever a distribuição de temperatura do ar, que circula nos dutos enterrados, e do solo, no entorno destes. Por fim, destaca-se a etapa da experimentação, que é detalhada logo a seguir no texto, e cujos resultados são apresentados e analisados no capítulo 5. Ainda, os resultados experimentais e os preditos pelo estudo numérico são comparados, buscando a validação física do modelo usado.

4.2 LOCAL DA PESQUISA

A parte experimental da pesquisa, como antes referido, se desenvolveu junto às instalações do Empreendimento Vila Ventura, no município de Viamão, no estado do Rio Grande do Sul. Com sua sede situada na microrregião da capital Porto Alegre, com latitude 30° 04' 51'' S, longitude 51° 01' 24'' W e altitude de 111 m, o município tem clima subtropical úmido.

4.3 APRESENTAÇÃO DO EXPERIMENTO

A etapa experimental da pesquisa foi estruturada com a finalidade de avaliar a técnica de usar dutos enterrados no solo, para circular o ar ambiente, buscando aproveitar a inércia térmica deste solo, como estratégia para diminuir o consumo de energia convencional, no condicionamento térmico de ambientes construídos.

Como se explica detalhadamente na sequência, para a parte experimental, foi construída uma edificação, especialmente concebida para a pesquisa, identificada como Casa Ventura, e enterrados dutos no solo, nas profundidades de 0,5 m e 1,6 m, interligando o ambiente externo aos ambientes internos da edificação. O ar captado do ambiente externo foi insuflado por um

ventilador nos dutos enterrados, para trocar calor com o solo e ser introduzido nos ambientes, misturando-se com o ar interno.

A presença de um grande reservatório de água, próximo ao local do experimento, motivou, por um período curto na experimentação, circular esta água pela serpentina de um *fan-coil*, colocado em um dos ambientes internos da edificação, para trocar calor com o ar ambiente, sendo re-circulado pela parte externa da referida serpentina pelo próprio ventilador do *fan-coil*.

Sensores digitais registraram as temperaturas e a umidade do ar dos ambientes internos e do ambiente externo, bem como as temperaturas do solo. Também foram registradas as temperaturas da água, em pontos de interesse no estudo.

Observa-se que, mais adiante na pesquisa (após o Exame de Qualificação), foi decidido usar estes registros experimentais para comparações com valores preditos em análises numéricas. Estes estudos foram acrescidos ao objetivo inicial da pesquisa e estão detalhados adiante, no texto.

Em sua estruturação física, tendo por referência a Casa Ventura, o experimento é ilustrado na figura 7. Como já referido na descrição do objetivo da pesquisa, esta edificação, com orientação norte, foi proposta com quatro ambientes: dois ambientes laterais, auxiliares na montagem do experimento; e mais dois ambientes centrais, com características equivalentes, para comparações em relação ao comportamento térmico.

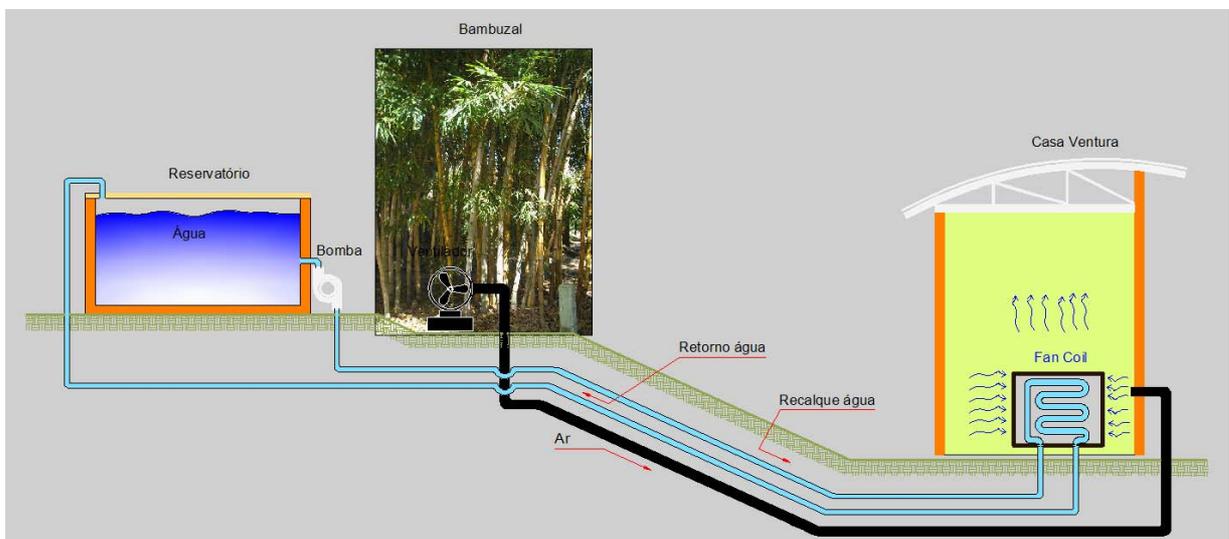


Figura 7: Ilustração do experimento

Seguindo o plano inicialmente definido para a experimentação, um destes ambientes centrais (lado oeste) foi mantido na condição natural, gerada pela condição climática do meio ambiente, e o outro (lado leste), o qual corresponde à ilustração da figura 7, foi condicionado termicamente, pela renovação de parte do ar interno, a partir de uma tomada de ar externo. A fração de ar renovado foi suficiente para cumprir com as exigências mínimas de higiene do ambiente, tendo em vista sua utilização futura. Próximo à Casa Ventura existe um microclima diferenciado, à sombra de um bambuzal, cujo efeito pode ser observado na temperatura do ar deste local. A proposta foi, então, usar este ar para insuflá-lo no ambiente, como ar de renovação, após fazê-lo passar por dutos enterrados, para trocar calor com o solo. Como foi insuflada no ambiente uma massa nova de ar, uma massa equivalente de ar saiu, naturalmente, do ambiente para o exterior, pelas frestas existentes nas aberturas e fechamentos do ambiente.

O pressuposto foi que o ar captado na área do bambuzal teria uma condição menos crítica, em relação àquela que ocorreria se fosse captado fora desta área. Ou seja: quando em período quente, o ar da área do bambuzal deverá estar mais fresco e, quando em período frio, o ar da área do bambuzal, protegido da ação direta do vento, deverá estar mais ameno. Ao passar pelo duto enterrado, o qual funciona como um trocador de calor solo-ar, o ar se aquece ou esfria. O solo retira calor dos dutos em dias quentes, diminuindo a temperatura do ar, e o solo cede calor aos dutos em dias frios, aquecendo o ar.

Para avaliação da contribuição da água do reservatório, no processo de trocas térmicas com o ar ambiente, foi instalado um *fan-coil*⁶, no interior do ambiente central (leste) da Casa Ventura, o mesmo em que houve a renovação do ar. Com auxílio de uma bomba, a água do reservatório foi circulada em uma tubulação, de forma a passar pela serpentina deste trocador de calor e retornar ao reservatório. Simultaneamente, para trocar calor com essa água, o ar ambiente foi circulado no trocador de calor, passando entre os dutos da serpentina, movido pelo próprio ventilador do equipamento. O ar de renovação foi insuflado no ambiente, próximo ao *fan-coil*, para melhorar a condição de mistura com o ar já existente no ambiente, ao passar pelo ventilador do *fan-coil*.

A expectativa foi de que, em dias frios, a água proveniente do reservatório tivesse temperatura superior à do ambiente e aquecesse o ar circulante, e, nos dias quentes, a água proveniente do

⁶ Trocador de calor composto por um ventilador e uma serpentina moldada com duto de cobre, adaptados ao interior de uma carenagem de plástico, dotada de aberturas para circulação de ar.

reservatório tivesse temperatura não muito inferior à do ambiente, mas que, mesmo assim, pudesse contribuir para esfriar o ar circulante no trocador de calor.

Para evitar a exposição dos dutos de recalque e retorno da água à radiação solar direta, esta tubulação que interliga o reservatório e o *fan-coil* foi enterrada no solo. A possibilidade de avaliar a troca de calor entre a água circulante e o solo não foi considerada significativa, dado que os dutos usados foram de polipropileno reforçado - PPR, com baixa condutância térmica, o que dificulta o processo de troca térmica.

Por questões operacionais, o monitoramento deste circuito da água e o funcionamento da bomba foram descontinuados no estudo, como se descreve adiante no texto; entretanto, o ventilador do *fan-coil* foi mantido funcionando durante toda a experimentação.

Seguindo a sequência acima e visando compor a parte empírica de obtenção dos dados, que deram suporte às análises e resultados da pesquisa, em linhas gerais, o processo experimental se estruturou a partir da necessidade de acompanhar o comportamento: da temperatura e umidade do ar ambiente externo; da temperatura e umidade do ar dos ambientes internos da Casa Ventura; da temperatura e umidade do ar ambiente, na área do bambuzal; da temperatura da massa d'água do reservatório; da temperatura, umidade e vazão do ar circulante no interior dos dutos enterrados; da temperatura e vazão da água circulante no interior dos dutos enterrados; da temperatura e vazão do ar e da água circulantes no trocador de calor; e da temperatura do subsolo em diferentes profundidades.

Com esta demanda, a estruturação física do experimento se dividiu em uma parte dirigida à implantação dos elementos construtivos básicos, necessários à consecução da pesquisa, na forma como foi proposta, e de outra parte, focada na implantação das instalações, tanto da rede elétrica de alimentação dos equipamentos usados, como da rede de aquisição e registro dos dados gerados na pesquisa. Na sequência do texto se descrevem estas etapas, nos seus aspectos de maior interesse e que contribuem para complementar o entendimento do trabalho realizado.

4.4 DESCRIÇÃO FÍSICA DO EXPERIMENTO

Os principais elementos construtivos que estruturaram a implantação do experimento são mostrados esquematicamente na figura 8. Aparecem, nesta figura: a Casa Ventura, com seus

quatro ambientes; a região de micro clima diferenciado pela existência do bambuzal; o reservatório d'água; a posição dos dutos enterrados para circular o ar; o posicionamento do ventilador; a posição dos dutos enterrados, para circular água; o posicionamento da bomba d'água; o posicionamento do *fan-coil*; a profundidade dos dutos, e o declive do terreno. As etapas da implantação, relacionadas à execução do experimento são descritas a seguir.

4.4.1 Projeto da Casa Ventura

O projeto conceitual da Casa Ventura foi elaborado por alunos do NORIE, conforme se explica na figura 9. Dentro do processo da pesquisa foi desenvolvido um projeto de execução correspondente. A figura 10 mostra a fachada; a figura 11, a planta baixa e a figura 12, um corte transversal da edificação, a qual se compõe por 2 ambientes laterais auxiliares e 1 ambiente central. Este espaço central, durante a experimentação, foi dividido em 2 ambientes, considerados equivalentes, que foram os espaços antes referidos como ambientes da pesquisa. Ambos os ambientes têm área aproximada de 15,1 m², cada, e volume aproximado de 55,2 m³, cada. Em termos do processo da pesquisa, então, a Casa Ventura, constituiu-se por 4 ambientes:

- ambiente A – ambiente central, situado a leste da edificação, que foi condicionado termicamente durante o experimento, contando com a renovação de ar, o *fan-coil* e as redes de água e ar;
- ambiente B – ambiente central, situado a oeste, que foi mantido na condição térmica natural durante o experimento, a qual foi gerada pelas condições climáticas do meio ambiente;
- ambiente C – ambiente lateral auxiliar, situado a leste, que foi usado como depósito dos materiais e equipamentos da pesquisa;
- ambiente D – ambiente lateral auxiliar, situado a oeste, que foi usado como local para montagem da central de distribuição elétrica e da central de gerenciamento, aquisição e registro dos dados gerados na pesquisa.

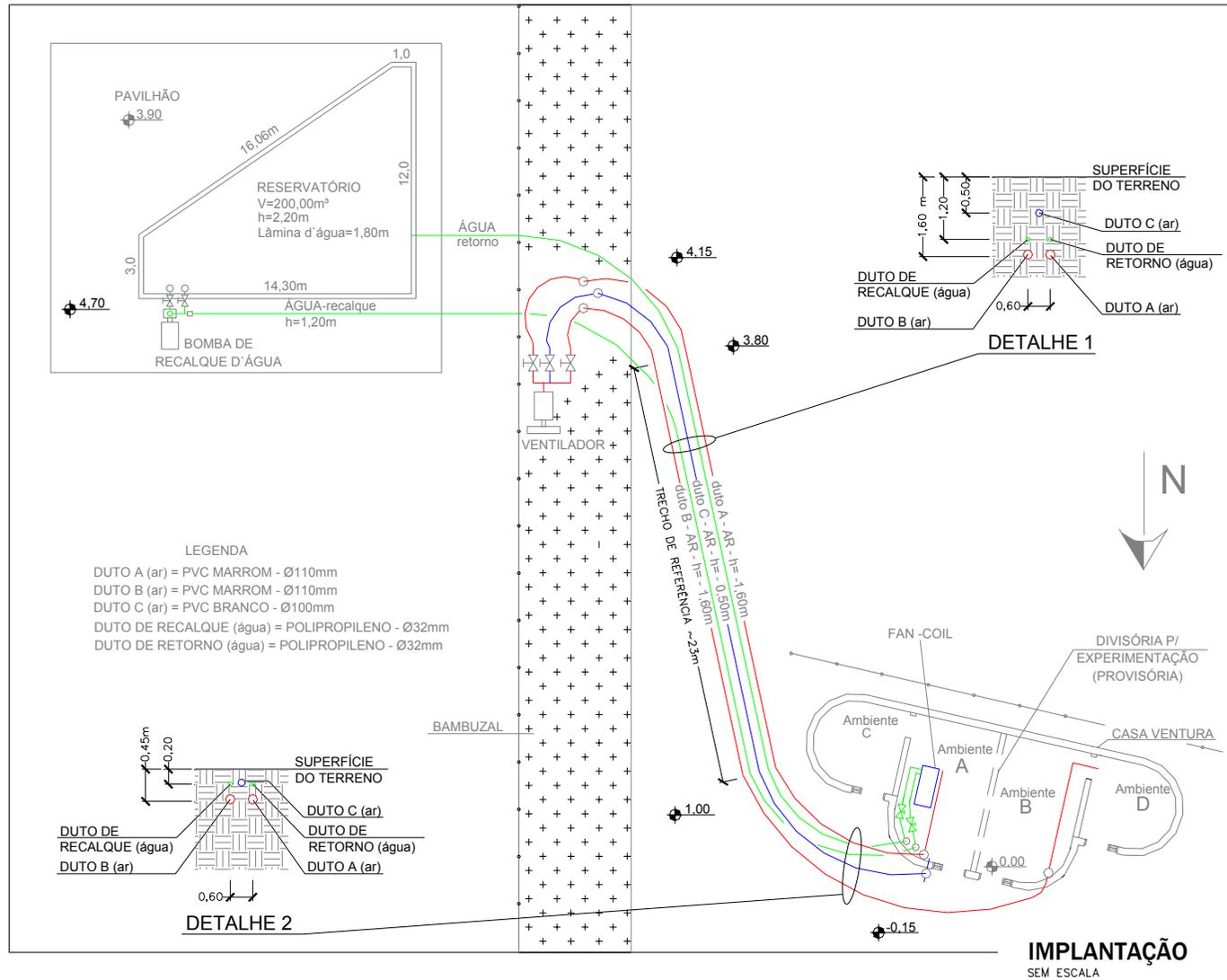


Figura 8: Implantação do experimento

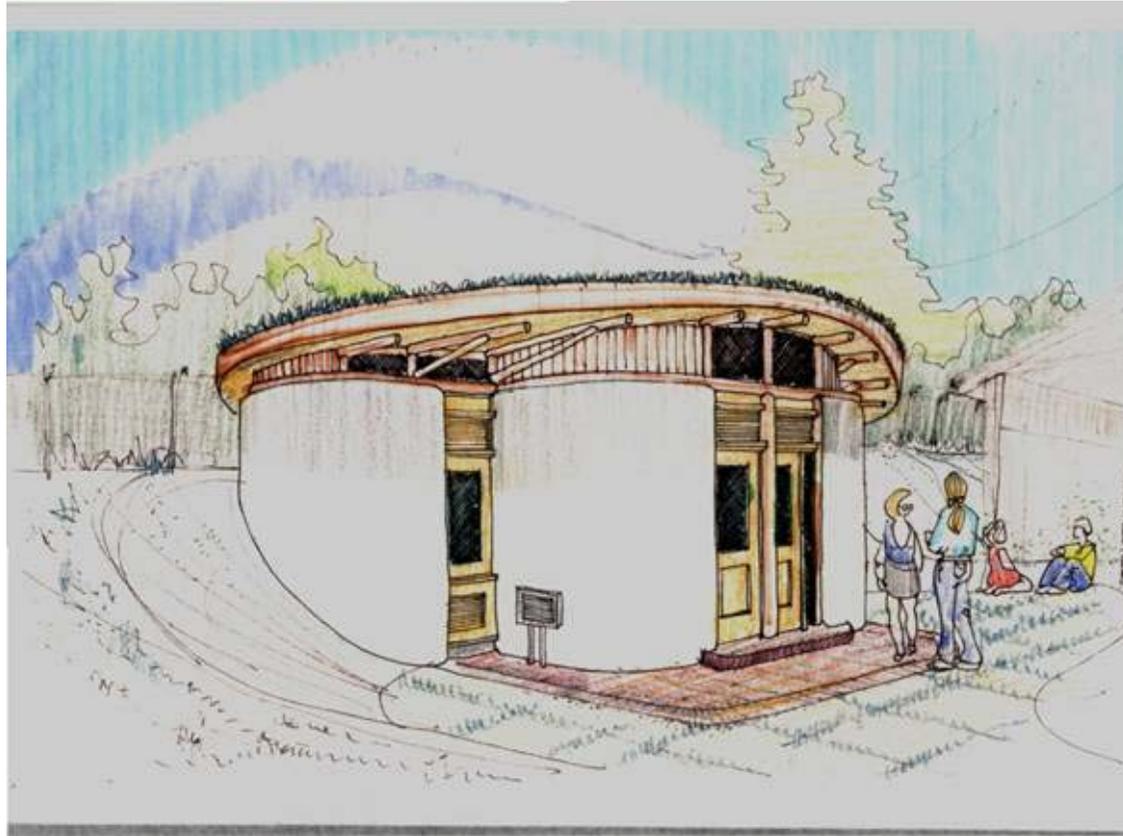


Figura 9: Perspectiva da Casa Ventura

O projeto conceitual da edificação foi concebido por um grupo de alunos do Norie, na disciplina de Edificações e Comunidades Sustentáveis do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Orientados pelo professor Dr. Miguel Aloysio Sattler, os alunos Carolina F. Mendes, Cristian Illanes, Daniela Walty, Juliana F. Hörlle, Leticia Frantz, Pery Bennett e Sheila C. Wendt desenvolveram o projeto de uma pequena edificação, visando à consecução desta pesquisa e, também, sua utilização futura, definida como um espaço pedagógico, destinado aos filhos dos funcionários e clientes do Vila Ventura, onde serão desenvolvidas habilidades na área da floricultura e jardinagem. Denominada pelos alunos de CASA VENTURA, a edificação foi projetada buscando um relacionamento harmonioso com a natureza, pelo uso de materiais e técnicas construtivas existente na região.

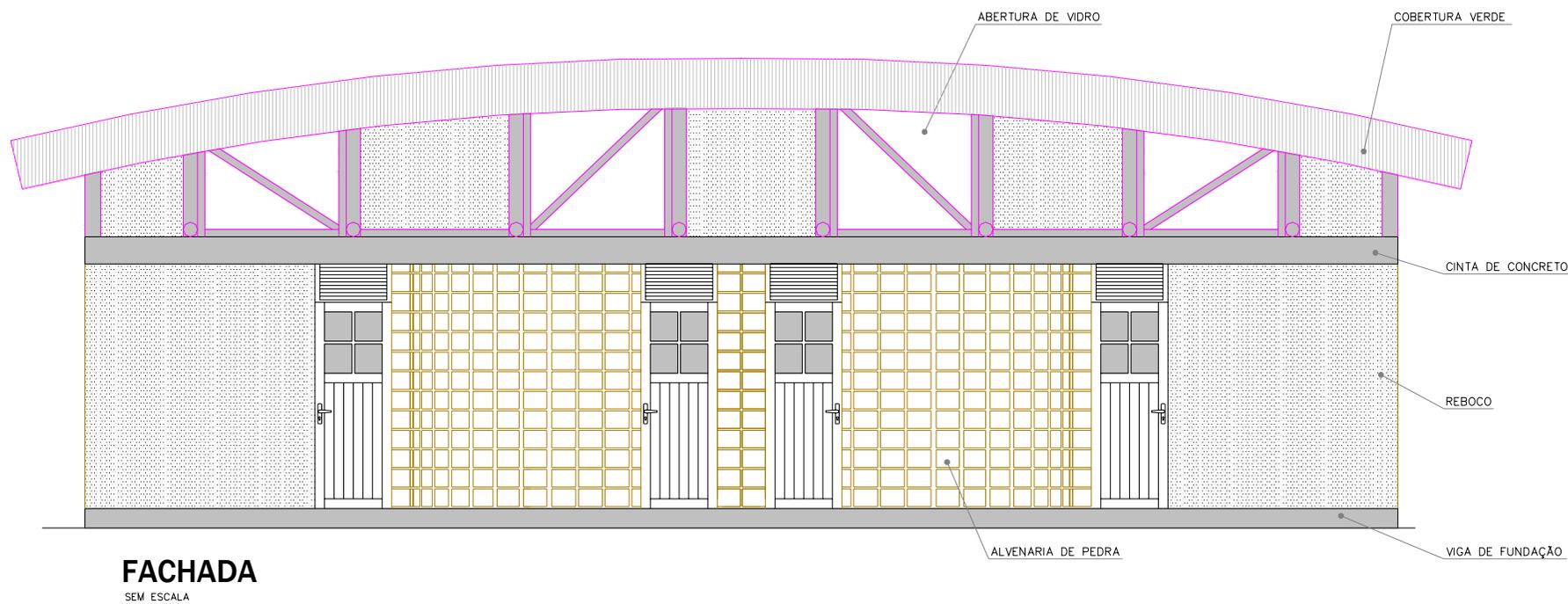


Figura 10: Fachada da Casa Ventura

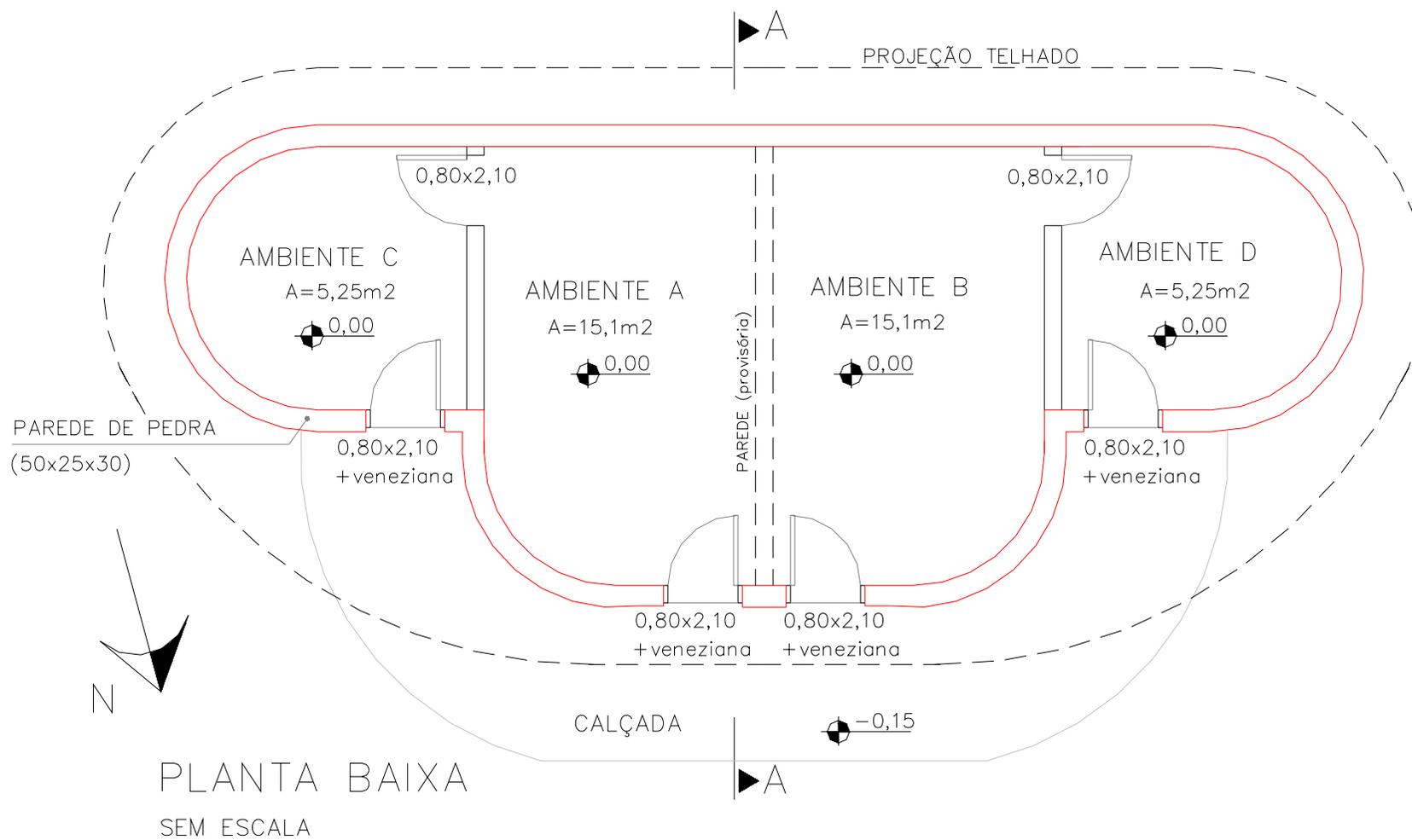


Figura 11: Planta baixa da Casa Ventura

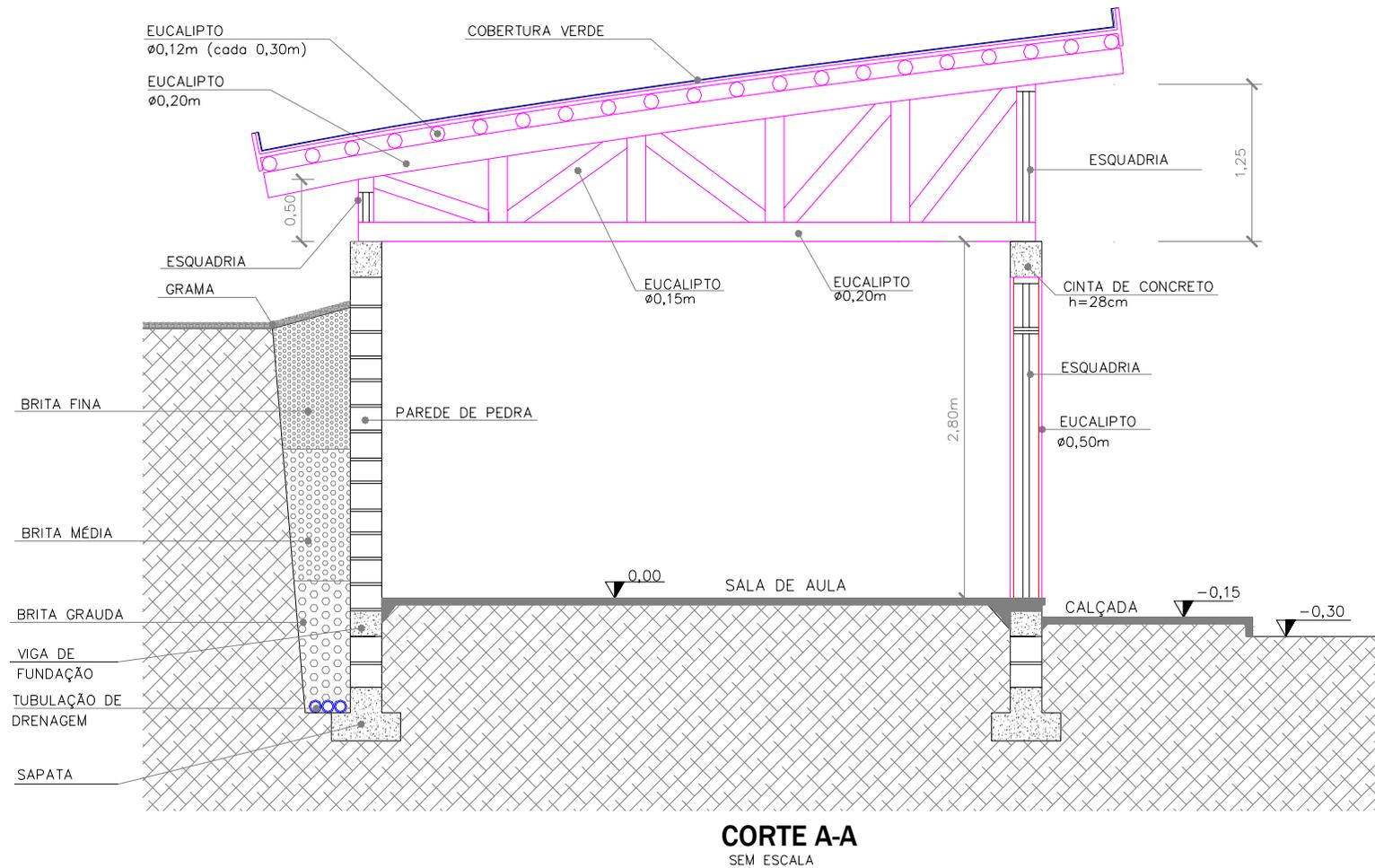


Figura 12: Corte transversal da Casa Ventura

4.4.2 Construção da Casa Ventura

A edificação foi executada com materiais de construção existentes na região e materiais reaproveitados, oriundos de demolições de outras construções ou excedentes de processos industrializados. A figura 13 mostra a fase de execução das paredes, com pedra grés, e a figura 14 e a figura 15 mostram a fase de estruturação da cobertura, feita com madeira de eucalipto. O elemento divisório entre os dois ambientes centrais, provisório durante a experimentação, foi feito em alvenaria de tijolos furados, revestido com argamassa pelos dois lados, para minimizar as trocas térmicas entre os ambientes. A figura 16 mostra a Casa Ventura, já finalizada, pronta para a etapa da experimentação no estudo.

4.4.3 Reservatório de água

Com capacidade para 200.000 litros de água e protegido da radiação solar direta, por cobertura de telhas de aço galvanizado, o reservatório deveria ser mantido sempre cheio, para abastecer o processo industrial desenvolvido na empresa. A posição relativa esquemática do reservatório, no experimento, aparece na figura 8. A figura 17 mostra duas das laterais do reservatório. A água, proveniente de um arroio próximo, abasteceria o reservatório por bombeamento, através de tubulação de PVC enterrada. O reservatório tinha 2,2 m de altura, com uma lâmina d'água, quando cheio, em torno de 1,80 m. Como já referido, este reservatório só esteve abastecido e disponível por um período curto na experimentação.

4.4.4 *Fan-coil* - ambiente A

O trocador de calor⁷ constituiu-se pela serpentina do *fan-coil* instalado no ambiente. Esta serpentina, em cobre, era adaptada ao interior de uma carenagem plástica, dotada de aberturas para entrada e saída do ar. Um ventilador acoplado a esta carenagem propiciou a circulação do ar do ambiente, passando pelo trocador de calor. A água vinda do reservatório, referido no item anterior, passou pela serpentina, trocando calor com o ar do ambiente, circulado pelo ventilador. A figura 18 mostra o *fan-coil*, já instalado no ambiente A e interligado à rede d'água.

⁷ O *fan-coil* usado no experimento foi cedido pela empresa Spring Carrier ao laboratório LEPTA da PUC/RS e repassado para a pesquisa. Trata-se de um *Fan-coil* 42 LSA – 1,2 TR. Vazão nominal de ar de 637 m³/h. Vazão recomendada de água de 0,73 m³/h. Potência do motor igual a 140 W.



Figura 13: Casa ventura – execução das paredes



Figura 14: Casa Ventura – estrutura da cobertura



Figura 15: Casa Ventura – execução da cobertura



Figura 16: Casa Ventura



Figura 17: Reservatório de água



Figura 18: *Fan-coil* – instalação no Ambiente A

4.4.5 Escavações no solo

Observa-se, no esquema da figura 8, que vários dutos foram instalados em diferentes profundidades e até quase 2,0 m abaixo da superfície do terreno. Para isto, foi feita uma escavação mecânica contínua, seguindo a implantação prevista, como mostra a figura 19. A reposição do material retirado foi manual, em camadas de, no máximo 0,20 m, cuidadosamente compactadas, de forma a garantir a recomposição do solo e o consequente preenchimento dos espaços de difícil acesso, gerados pela superfície curva dos dutos enterrados.



Figura 19: Escavações para colocação dos dutos

4.4.6 Rede de dutos para circulação de água

A rede de dutos de PPR⁸, com diâmetro 32 mm, enterrada na profundidade de 1,20 m, foi destinada à circulação da água entre o reservatório d'água e o *fan-coil* colocado no ambiente A. A implantação esquemática desta rede, mostrando os trechos de sucção, recalque e retorno, aparece na figura 8. Uma bomba centrífuga⁹, com pré-filtro e diâmetro nominal de entrada e saída de 60 mm, instalada junto ao reservatório d'água, afogada, que pode ser vista na figura 17, foi responsável pela pressurização da rede. O trecho de sucção da bomba foi feito em PVC

⁸ Os dutos e conexões de polipropileno reforçado – PPR/32 mm, usados na pesquisa foram cedidos pela Amanco Brasil SA que, após análise da proposta de pesquisa, decidiu por participar do processo. Além dos dutos e conexões a empresa forneceu todas as ferramentas necessárias e fez o treinamento dos profissionais que instalaram o produto.

⁹ A bomba utilizada no experimento é auto-escorvante, com pré-filtro, fabricada pela DANCOR: potência - 2CV; altura manométrica total – 22 m; e diâmetro da sucção e recalque – 60 mm. Este equipamento, pertencente ao grupo SAMPAR Agropecuária Ltda, estava disponível e foi cedido para a pesquisa.

marrom - 60 mm. A entrada do duto de sucção, no interior do reservatório, foi protegida por um filtro, feito com sacos de areia e brita. Além de a bomba ter pré-filtro, para garantir a não circulação, na rede, de pequenos sólidos, que pudessem obstruir os dutos de cobre do trocador de calor, outro filtro de linha foi colocado no início do trecho de recalque. Este trecho de recalque também foi executado em PVC marrom – 60 mm e nele foi feita uma derivação, com registro, que permite que a água retorne ao reservatório. Esta derivação, que pode ser vista na figura 17, na realidade, foi um dispositivo para permitir o controle da vazão d'água no sistema. Logo após esta derivação, a rede passa a ser em duto de PPR – 32 mm, enterrada no solo, prolongando-se até o ambiente A, passando pelo *fan-coil* e retornando ao reservatório. A rede vai, também, até o ambiente B, mas este trecho foi temporariamente desativado durante a experimentação, visto a proposta de não intervir nas condições do ambiente B, mantendo-o na condição natural, gerada pelo próprio meio ambiente. A figura 20 mostra a instalação destes dutos no solo, o trecho de recalque e trecho de retorno, quando da montagem do experimento. A rede de dutos acompanhou a declividade do terreno, como se pode observar pelas indicações de níveis, na figura 8. Próximo ao reservatório, tanto a tubulação de sucção, como a de recalque e a de retorno, são aéreas.



Figura 20: Tubulação d'água – recalque e retorno

4.4.7 Rede de dutos para circulação de ar

Para circulação do ar através do solo foram programados três trechos de dutos enterrados, ou seja, três trocadores de calor solo-ar. Dois, executados em dutos de PVC marrom (material reciclado), com diâmetros de 110 mm, enterrados na profundidade de 1,60 m e afastados de 0,60 m, designados como dutos A e B e destinados ao escoamento do ar entre o bambuzal e os ambientes A e B, respectivamente. A implantação esquemática destas redes aparece na figura 8. Um ventilador centrífugo¹⁰, de alta pressão, colocado dentro da área do bambuzal, insuflou o ar nos dutos, os quais afluíam nos ambientes pelo piso. Portanto, o duto A se destinava à renovação do ar do ambiente A e o duto B, da renovação do ar do ambiente B. Observa-se, na figura 8, pelas indicações de níveis, que os dutos acompanharam a declividade do terreno. A figura 21 mostra a instalação destes dutos, quando da montagem do experimento.

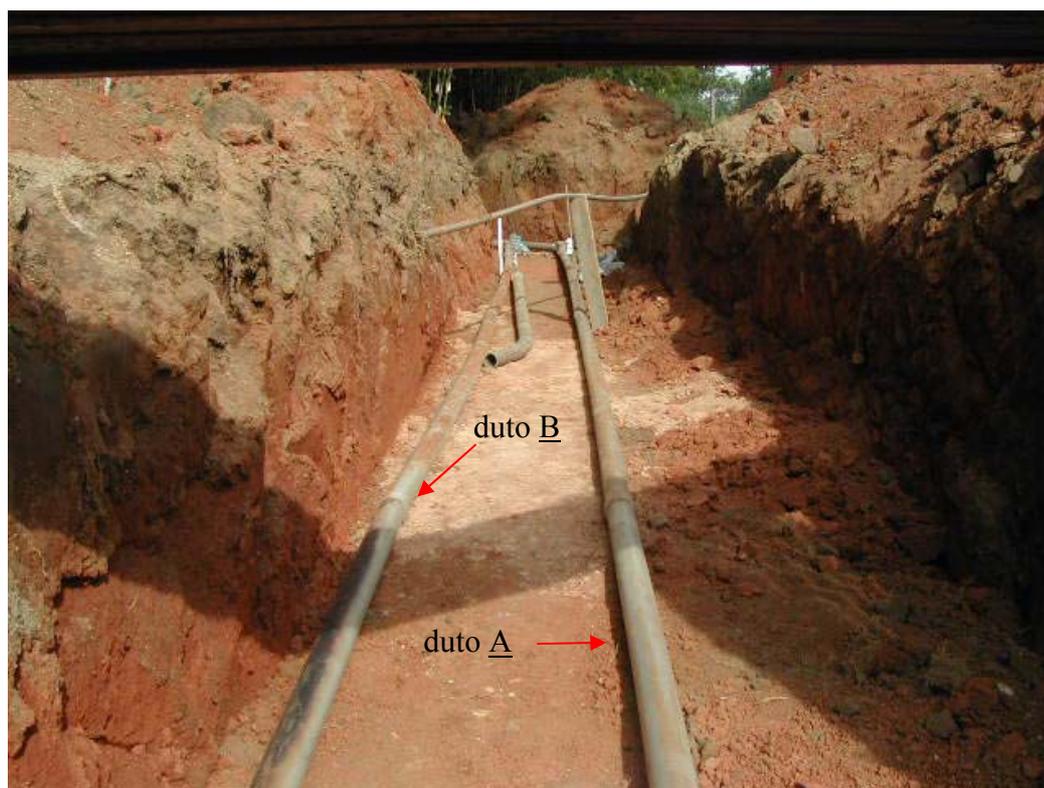


Figura 21: Tubulação de ar – dutos A e B

¹⁰ O ventilador utilizado na pesquisa é um soprador fabricado pela VENIBRAS, com pressão de 2.100 mmca, vazão de 3m³/min e seção de 60 mm. Este equipamento, pertencente ao grupo Sampo Agropecuária Ltda, estava disponível e foi cedido para a pesquisa.

A outra rede, executada em dutos de PVC branco (material reciclado), com diâmetro de 100 mm, enterrada na profundidade de 0,50 m, se destinou, também, ao escoamento do ar de renovação para o ambiente A. É o duto C, que recebeu ar da zona do bambuzal, através do mesmo ventilador descrito no item anterior. A implantação esquemática desta rede também aparece na figura 8.

4.4.8 Ar de renovação - ambiente A

O ambiente A pode receber ar de renovação pelos dutos A e C. Durante a experimentação, recebeu ar só do duto A. Na figura 18, é possível observar o afloramento do duto A, no piso interno do ambiente e o elemento de distribuição do ar de renovação, que se estende horizontalmente sobre o piso. Este elemento foi um prolongamento do duto A, até a frente do *fan-coil*, intermediado por um duto flexível, de mesmo diâmetro nominal. Na parte final do prolongamento, o duto de PVC foi fechado por um tampão e rasgado longitudinalmente em sua superfície lateral (80x2 cm²), para garantir a distribuição do ar, em toda a largura do *fan-coil*. A área desta abertura longitudinal rasgada foi, aproximadamente, o dobro da seção transversal do duto.

Já, a figura 22 mostra o afloramento do duto C à superfície do solo, o que ocorre junto à edificação, mas na parede externa ao ambiente A. Uma dupla saída, na parte final do duto, permite a opção de insuflar o ar no ambiente A ou desviá-lo para o exterior. Como opção no experimento, este ar não foi aproveitado para renovação do ar do ambiente A. É possível observar, na figura 18, o tampão, em PVC branco, que impede a entrada deste ar para o interior do ambiente. A manutenção do fluxo de ar neste duto, durante a experimentação, justificou-se pelo processo de monitoramento de dados de temperatura e umidade do ar, no interior de dutos enterrados, explicado adiante.

4.4.9 Ar de renovação - ambiente B

O ambiente B pode receber ar de renovação do duto B. Como o ambiente B foi mantido na condição natural, gerada pela condição climática do meio ambiente, o ar de renovação, vindo deste duto, foi desviado, temporariamente, para o ambiente D, no qual foram colocados os equipamentos de gerência e aquisição de dados na pesquisa. A manutenção do fluxo de ar, neste duto, também se justificou pelo processo de monitoramento de dados de temperatura e umidade do ar, no interior de dutos enterrados, também explicado adiante.



Figura 22: Tubulação de ar – duto C

4.4.10 Captação do ar externo

A figura 23 e a figura 24 mostram o ventilador instalado na zona do bambuzal e sua interligação aos dutos A, B e C de escoamento do ar. Tanto a sucção, como a saída do ventilador, tem diâmetro de 60 mm e foram adaptadas com dutos de PVC marrom, de mesma bitola. O ar aspirado, a partir do bocal de sucção, protegido por um filtro (tela plástica fina), foi direcionado, na saída do ventilador, para as 3 redes de dutos enterrados, dutos A, B e C, por meio de derivações dotadas de registros, conforme mostra a figura 23. Os registros permitiriam regular o fluxo de ar nos dutos. Durante todo o experimento, entretanto, estes registros foram mantidos totalmente abertos. As interligações entre as derivações, na saída do ventilador, e os bocais dos dutos enterrados foram feitas com dutos flexíveis corrugados de polietileno (material reciclado), conforme mostra a figura 24. As derivações e os dutos de ligação foram envolvidos por papel alumínio, para proteger os dutos dos raios solares. Além disso, todo o conjunto foi coberto por telhas de aço galvanizado, isoladas, na face inferior, por chapas de poliuretano (material reciclado).



Figura 23: Ventilador – sucção protegida por filtro (tela)

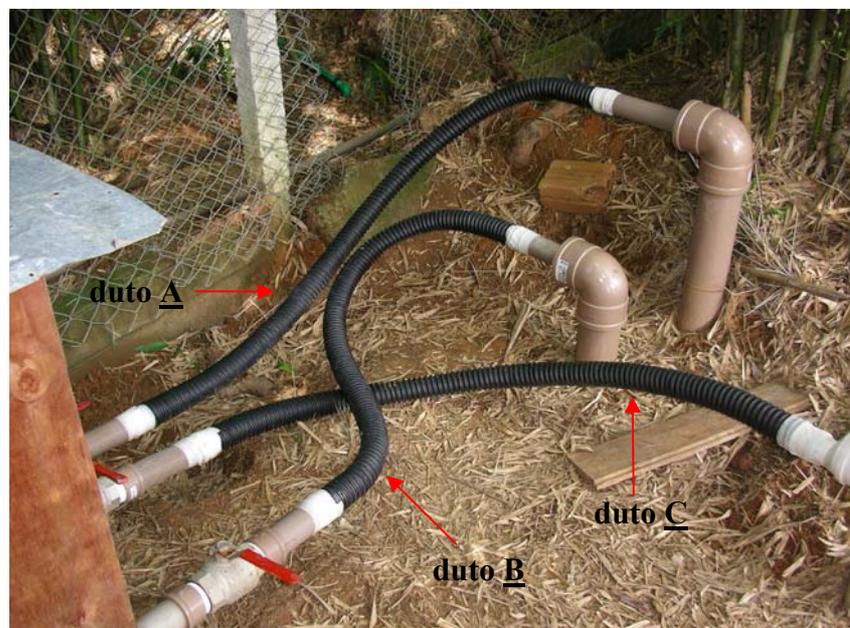


Figura 24: Interligação do ventilador aos dutos enterrados

4.4.11 Tubulações, para as redes, de dados e elétrica

Aproveitando a escavação, realizada para colocação dos dutos de ar e água no solo, foram instaladas duas redes de dutos de PVC marrom (material reciclado), diâmetro 60 mm, paralelas, enterradas na profundidade de 0,30 m: uma, para passar a rede de fios elétricos, de alimentação dos equipamentos e do sistema de aquisição de dados da pesquisa; e outra, para passar a rede de cabos de gerenciamento deste sistema. A figura 25 mostra a implantação destas redes, na qual os trechos das tubulações são intercalados por caixas de passagem, para facilitar a instalação, inspeção e a manutenção dos fios e cabos.

Ambas as redes foram interligadas ao ambiente D que, como antes referido, foi o local onde se centralizou a alimentação elétrica dos equipamentos de aquisição de dados e o próprio sistema de aquisição de dados. Aparecem, ainda, na figura 25, os Centros de Distribuição de Controladores de dados (CDCs) e Centros de Distribuição de circuitos elétricos (CDs), que permitiram organizar e proteger, tanto as linhas de dados, como os circuitos elétricos, respectivamente.

Observa-se, na figura 25, que a projeção destas tubulações e caixas foi deslocada, em relação à projeção das redes de ar e água, de forma a não haver interferência no processo de transferência de calor de origem solar, entre a superfície do solo e os dutos enterrados, de ar e água.

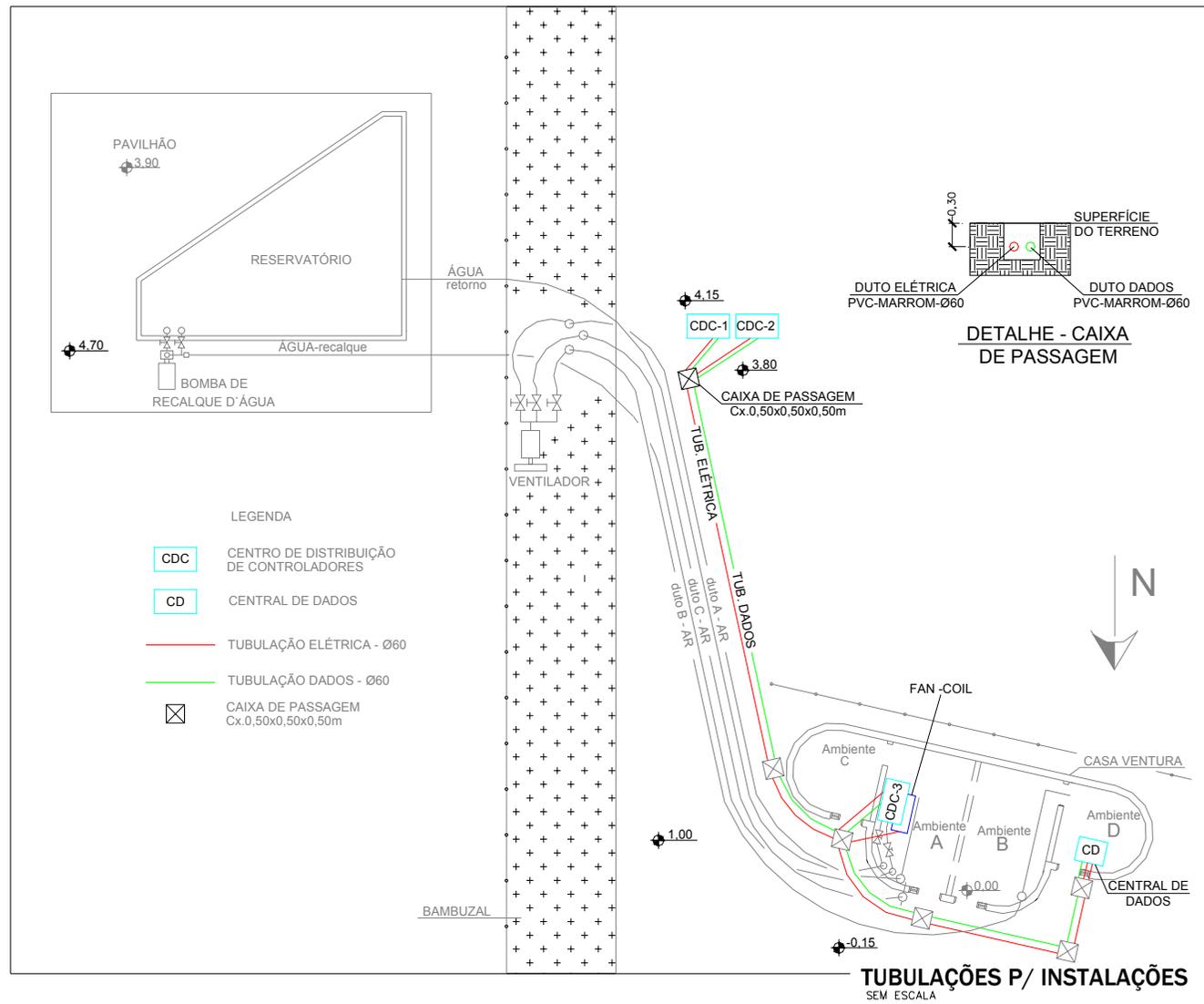


Figura 25: Implantação das tubulações, para redes, de dados e rede elétrica

4.4.12 Alimentação elétrica do experimento

A rede elétrica de alimentação e proteção dos equipamentos e instalações constituintes do experimento, em 220/380 V, executada a partir das tubulações mostradas na figura 25, foi dotada de proteção, contra surtos elétricos, do tipo *clammer*. A energia deriva da rede, que alimenta o empreendimento Vila Ventura. Em paralelo a esta rede, existe um gerador de corrente elétrica, que é dotado de acionamento automático, no caso de falta de energia.

Conforme a figura 26, um centro de distribuição, com 2 circuitos trifásicos (380 V), localizado no pavilhão do reservatório d'água, alimentava e protegia a rede da bomba d'água e a rede do ventilador. Outro centro de distribuição, com 3 circuitos monofásicos (220 V), localizado no ambiente D, da Casa Ventura, alimentava e protegia, respectivamente, a rede de iluminação interna da edificação, a rede de tomadas, e a rede de alimentação elétrica do *nobreak*, que protegia o sistema de aquisição e gerenciamento de dados na pesquisa, o qual era centralizado neste ambiente. Para este último centro de distribuição, a figura 26 mostra somente o circuito que alimenta o *nobreak*. Todos os circuitos são aterrados. Em termos gerais, o sistema de dados se compunha de uma sequência de instrumentos analógicos, para aquisição de dados, interligados por uma rede (rede de dados), que se conectavam ao computador, através de uma interface serial, de conversão de sinais. Todos os instrumentos, a interface e o computador eram alimentados por redes elétricas monofásicas secundárias (110 V), derivadas do *nobreak*.

Devido à possibilidade de acionamento do gerador de energia, em caso de falta de energia elétrica, e o estabelecimento de regimes transientes de fornecimento de energia, potencialmente prejudiciais aos equipamentos do experimento, foi instalado, na alimentação do sistema, um relé temporizador com retardo, regulado para 20s. Ao ser ligado o gerador, ou ao retornar a energia da concessionária, o *nobreak* só era desativado, em sua função de garantir fornecimento de energia ao sistema, 20 s após, ou seja, com o fornecimento de energia já estabilizada, em regime permanente.

O *nobreak*, então, gerenciava e protegia, através dos circuitos acima descritos, a alimentação elétrica de todos os controladores analógicos instalados, da interface, do computador e, também, do ventilador do *fan-coil*. O detalhe da figura 26 mostra, esquematicamente, a estruturação deste circuito.

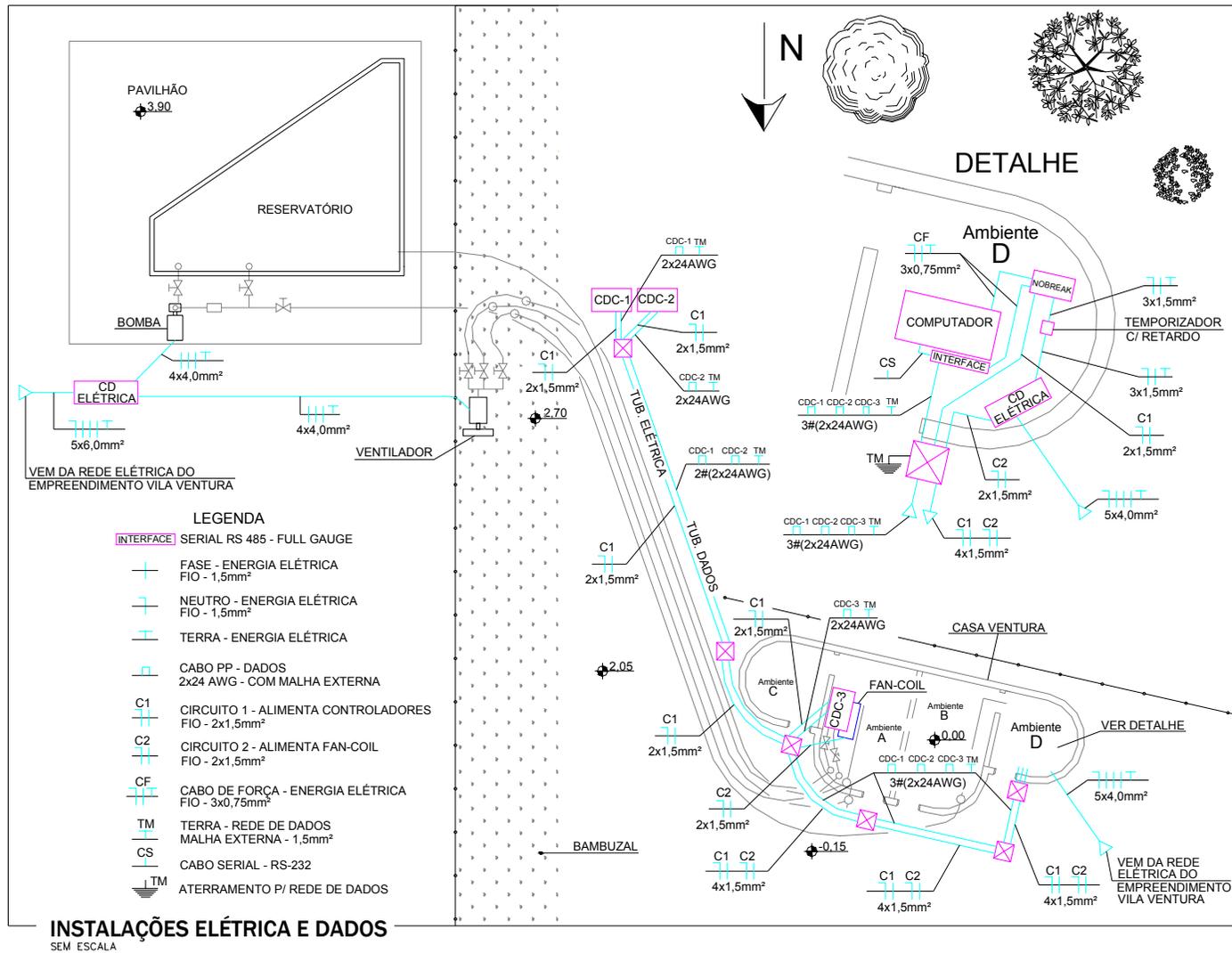


Figura 26: Rede de dados e rede elétrica

4.5 ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO NO VILA VENTURA

Conforme Streck et al. (2002), o município de Viamão, situado na Grande Porto Alegre, região metropolitana da capital do estado do Rio Grande do Sul, apresenta solo em relevo suavemente ondulado, sendo composto por granitos e migmatitos, nos declives e partes mais altas das ondulações, e por depósitos sedimentares recentes, nas planícies aluviais.

Um estudo¹¹, especialmente realizado junto às instalações do Empreendimento Vila Ventura, com o objetivo de apresentar a caracterização morfológica e física do solo no local, está apresentado em Bastos et al. (2009). O perfil do solo foi descrito morfológicamente, segundo critérios pedológicos, como Argissolo Vermelho-Amarelo, originário de rocha granítica. A partir da caracterização física por métodos geotécnicos, foram determinados os índices físicos do solo, ao longo de sua profundidade. O cruzamento das informações de cunho pedológico e geotécnico permitiu caracterizar adequadamente o solo local e melhor interpretar as características físicas deste, frente à sua gênese. A tabela 4 resume os índices físicos obtidos para o perfil estudado. Como base neste estudo, o solo foi admitido, na pesquisa, com peso específico igual a 1800 kg/m³ e com teor de umidade natural médio de 25 %.

Tabela 4: Índices físicos do perfil de solo estudado, em Viamão

Profundidade (m)	γ (kg/m³)	w (%)	γ_d (kg/m³)	γ_s (kg/m³)	Índice de vazios	S (%)
0,25	1700	18,6	1440	2650	0,85	58,3
0,55	1660	27,5	1300	2750	1,12	67,9
1,00	1680	31,2	1280	2710	1,12	75,8
1,50	1870	23,8	1510	2740	0,82	79,6
2,00	1870	16,5	1600	2690	0,68	65,5

γ - peso específico aparente natural; w – teor de umidade natural; γ_d – peso específico aparente seco; γ_s – peso específico real dos grãos; S – grau de saturação.

¹¹ Este estudo foi uma contribuição a esta pesquisa dos professores Élvio Giasson (UFRGS) e Cezar Augusto Burkert Bastos (FURG).

4.6 INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

4.6.1 Dados de temperatura e umidade

Para a etapa de análises, na pesquisa, foi necessário conhecer os registros de dados de temperatura e/ou umidade, bem como os dados relativos aos escoamentos, referentes aos elementos envolvidos, propostos no sistema experimental. Ou seja, como já referido, dados do meio ambiente externo, dos ambientes internos, do reservatório, do subsolo, dos escoamentos do ar, no interior dos dutos enterrados e no *fan coil*, e do escoamento de água. Na aquisição e registro destes dados foram utilizados equipamentos e procedimentos, que são descritos a seguir.

4.6.2 Sistema Sitrad – gerência dos dados de temperatura e umidade

As aquisições e registros de dados de temperatura e umidade no experimento foram realizados com o auxílio de controladores digitais analógicos, fabricados pela *Full Gauge Controls*. Foram dois os tipos de controladores usados na pesquisa, conforme detalhado nas figuras 27 e 28, colocadas a seguir. A precisão dos sensores de temperatura é de $\pm 0,1$ °C e dos sensores de umidade, ± 1 %.

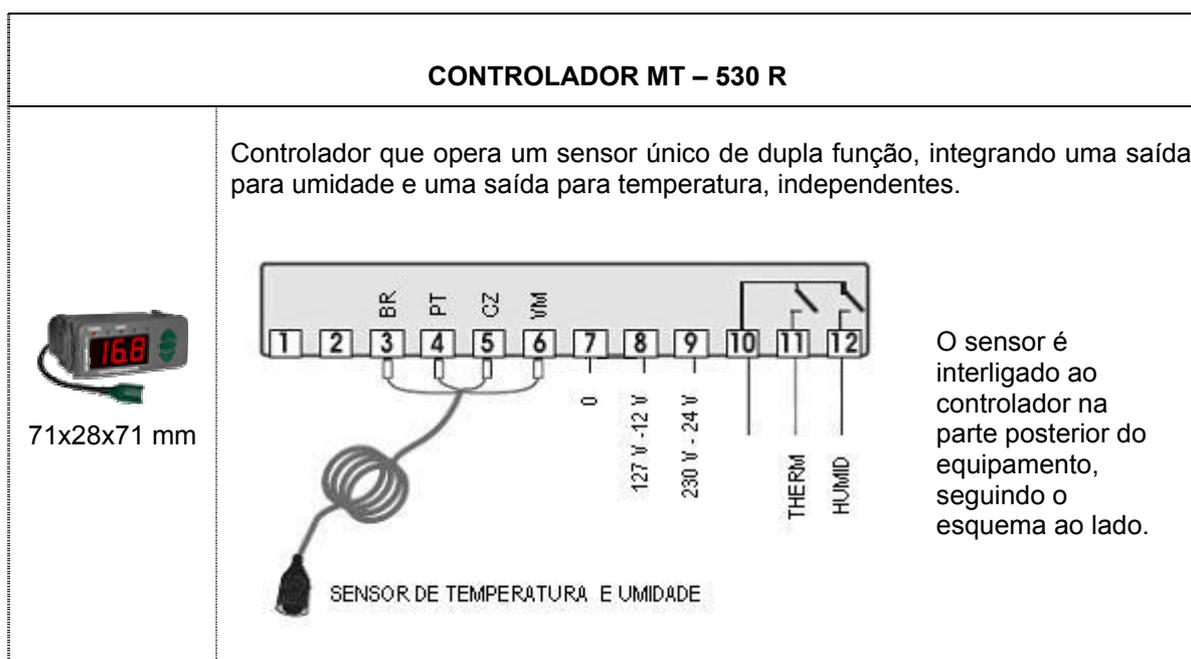


Figura 27: Controlador MT 530 - *Full Gauge*

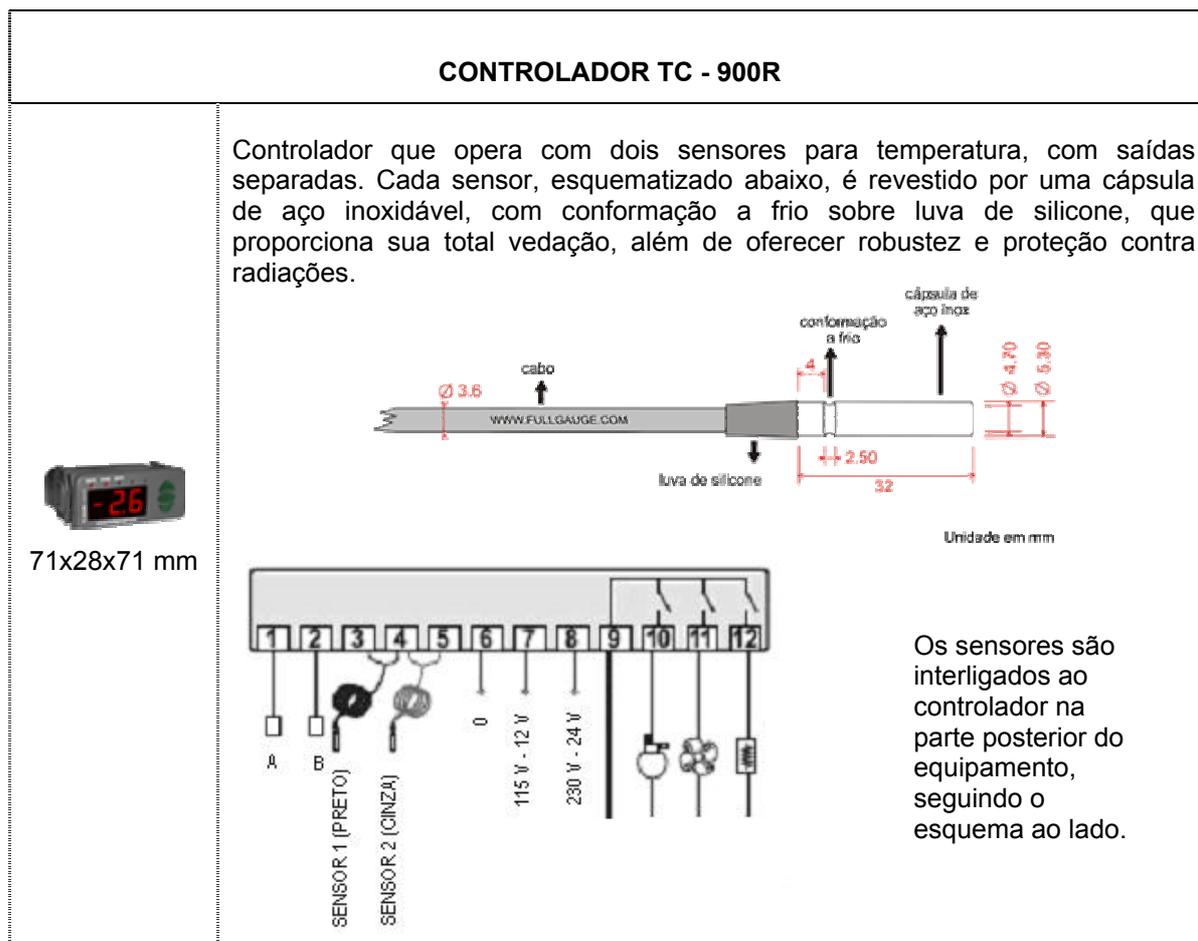


Figura 28: Controlador TC 900 - *Full Gauge*

4.6.2.1 *Software* Sitrad

O *software* Sitrad, desenvolvido pela *Full Gauge*, propiciou o gerenciamento do processo de aquisição de dados. Ele avalia, configura e armazena os dados de temperatura e umidade, continuamente. Permite, também, fazer a análise do histórico, através de gráficos, gerados a partir dos arquivos de dados armazenados. Possui conexão servidor/cliente, que possibilita o acesso remoto ao *software* e, conseqüentemente, aos arquivos de dados. Para isto, constitui-se de dois módulos: o módulo LOCAL, instalado no computador em que estão conectados os controladores, através de uma interface serial; e o módulo REMOTE, instalado em um computador remoto (distante), que se comunica com o módulo LOCAL. A interface, como já referido, é um dispositivo utilizado para comunicação serial dos instrumentos controladores com o computador. Sua função é converter o sinal de comunicação serial, padrão RS-232, do computador, para o padrão RS-485, dos controladores. Cada interface (CONV96) comunica

com até 96 controladores *Full Gauge*. O funcionamento do Sitrad seguiu o esquema ilustrado na figura 29.

No experimento, o módulo LOCAL do Sitrad foi instalado em um computador PC, protegido por um *nobreak* senoidal, com tempo de autonomia de 20 min, formando a central de aquisição de dados da pesquisa, estruturada no ambiente D, da Casa Ventura. O *nobreak* foi alimentado com tensão em 220V e gerou a saída em tensão de 110V. Conforme antes referido, o *nobreak* alimentou, além do computador, os controladores e a interface que compõe o sistema.

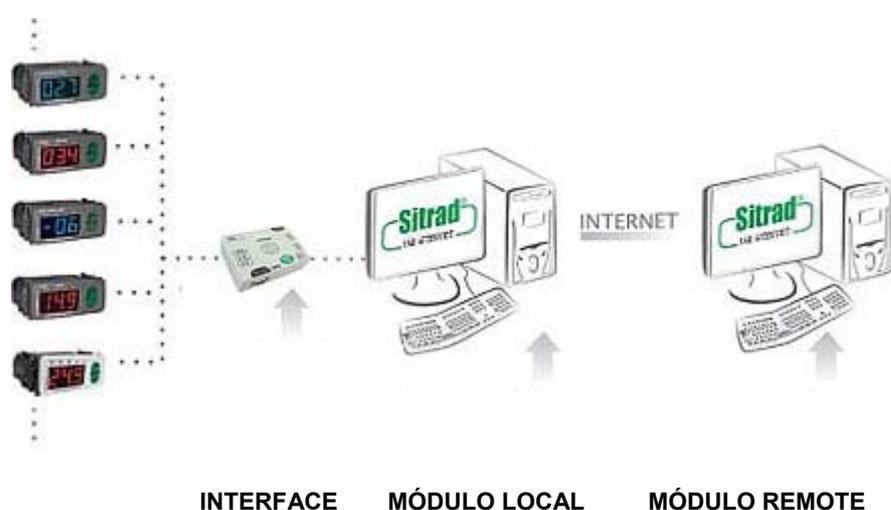


Figura 29: Funcionamento do Sitrad

4.6.2.2 Descrição do sistema Sitrad

Foram 11 instrumentos controladores, do tipo MT 530, e 7 instrumentos controladores, do tipo TC 900, instalados na pesquisa. Os controladores foram organizados em 3 centros de distribuição de controladores, identificados como CDC1, CDC2 e CDC3, como mostra a figura 25. Os centros CDC1 e CDC2, montados próximo à área do bambuzal, abrigavam os controladores, que gerenciavam os sensores de temperatura e umidade, relacionados à área externa do experimento e podem ser visualizados na figura 30. O centro CDC3, montado no interior do Ambiente A da Casa Ventura, organiza os controladores, que gerenciam os sensores de temperatura e umidade, relacionados à área interna do experimento e seus arredores e pode ser visualizado na figura 31.



Figura 30: Centros de distribuição – CDC1 e CDC2

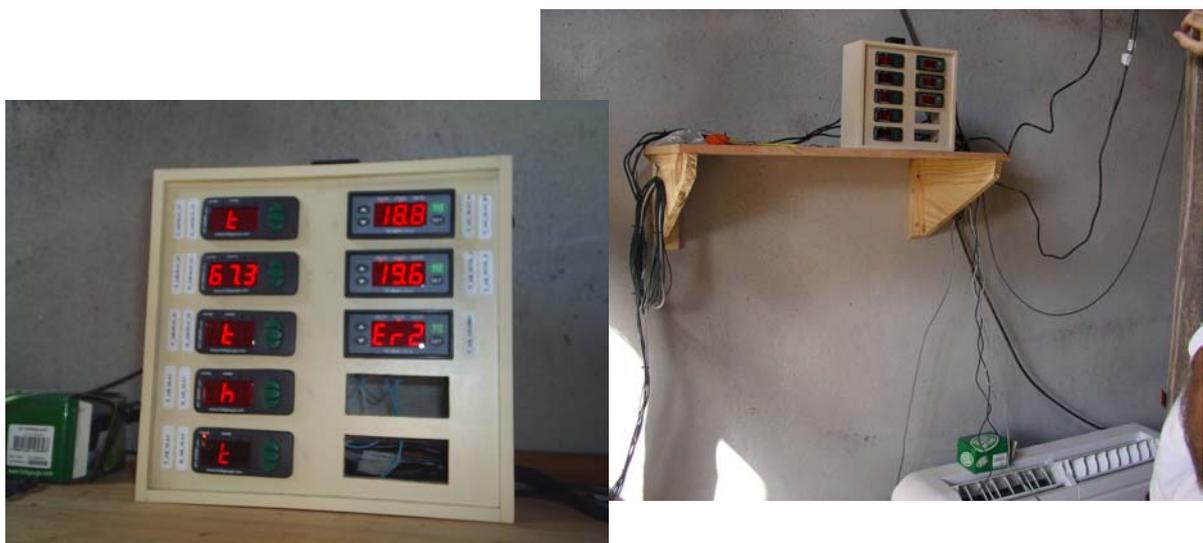


Figura 31: Centro de distribuição – CDC3

Para montagem do sistema de aquisição de dados, seguindo as orientações da *Full Gauge*, em cada CDC os instrumentos controladores foram alimentados eletricamente (110V) e interligados, um por vez, à rede de dados. Esta interligação se fez através de caixas distribuidoras padrões e cabos bipolares simples. Todos os terminais A e todos os terminais B dos instrumentos foram conectados aos terminais A e B, respectivos, das caixas distribuidoras. Usando um cabo bipolar, protegido por malha externa, ainda em cada CDC, todas as caixas distribuidoras foram interconectadas. As caixas distribuidoras possuem mais um terminal M, para aterramento, que os instrumentos controladores não possuem. A malha externa do cabo bipolar foi conectada aos terminais M das caixas distribuidoras. Os cabos bipolares, com malha externa, dos CDC foram prolongados até o ambiente D, da Casa Ventura, e interligados à interface, observando-se a ordem A, B e M dos terminais. A interface foi conectada ao computador e aterrada, a partir do terminal M.

A figura 26 mostra os detalhes da instalação da rede de dados e da instalação da rede elétrica, que se interligam aos controladores e equipamentos do experimento.

As tabelas 5, 6 e 7 resumem as informações sobre o posicionamento dos controladores e, também, dos sensores usados para os registros de temperaturas e umidades no experimento, bem como definem a identificação e função de cada um destes instrumentos na pesquisa. Os controladores e sensores possibilitam o monitoramento simultâneo de 25 leituras de temperatura e 11 leituras de umidade.

Tabela 5: Centro de distribuição de controladores - CDC 1

CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO – CDC1			
CONTROLADOR		SENSOR	FUNÇÃO
END	TIPO		
DUTOS ENTERRADOS – posição de monitoramento 3 (ver figura 32)			
101	MT 530	ST-101/1	Temperatura do ar dentro do duto <u>A</u> - na posição de monitoramento 3
		SU-101/2	Umidade do ar dentro do duto <u>A</u> - posição de monitoramento 3
102	MT 530	ST-102/3	Temperatura do ar dentro do duto <u>B</u> - posição de monitoramento 3
		SU-102/4	Umidade do ar dentro do duto <u>B</u> - posição de monitoramento 3
103	MT 530	ST-103/5	Temperatura do ar dentro do duto <u>C</u> - posição de monitoramento 3
		ST-103/6	Umidade do ar dentro do duto <u>C</u> - posição de monitoramento 3
AMBIENTE EXTERNO – ar (área aberta)			
104	MT 530	ST-104/7	Temperatura do ar ambiente -1,8 m de altura (área aberta/protegida da insolação)
		SU-104/8	Umidade do ar ambiente -1,8 m de altura (área aberta/protegida da insolação)
RESERVATÓRIO D'ÁGUA – massa d'água			
201	TC 900	ST-201/9	Temperatura da massa d'água no reservatório - profundidade de 1,50 m
		ST-201/10	Temperatura da massa d'água no reservatório - profundidade de 0,70 m
DUTOS ENTERRADOS – água			
202	TC 900	ST-202/11	Temperatura da água dentro do duto - trecho de recalque (próximo a bomba)
		ST-202/12	Temperatura da água dentro do duto - trecho de retorno (próximo ao reservatório)

Tabela 6: Centro de distribuição de controladores - CDC 2

CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO – CDC2			
CONTROLADOR		SENSOR	FUNÇÃO
END	TIPO		
SUBSOLO			
206	TC 900	ST-206/13	Temperatura do subsolo na profundidade de 0,05 m
		ST-206/14	Temperatura do subsolo na profundidade de 0,30 m
207	TC 900	ST-207/15	Temperatura do subsolo na profundidade de 0,50 m
		ST-207/16	Temperatura do subsolo na profundidade de 1,00 m
208	TC 900	ST-208/17	Temperatura do subsolo na profundidade de 2,00 m
		ST-208/18	Temperatura do subsolo na profundidade de 3,00 m
VENTILADOR			
110	MT 530	ST-110/19	Temperatura do ar captado da área do bambuzal
		ST-110/20	Umidade do ar captado da área do bambuzal
111	MT 530	ST-111/21	Temperatura do ar circulante na insuflação do ventilador
		ST-111/22	Umidade do ar circulante na insuflação do ventilador

Tabela 7: Centro de distribuição de controladores - CDC 3

CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO – CDC3			
CONTROLADOR		SENSOR	FUNÇÃO
END	TIPO		
DUTOS ENTERRADOS – posição de monitoramento 4 (ver figura 32)			
105	MT 530	ST-105/23	Temperatura do ar dentro do duto <u>A</u> - posição de monitoramento 4
		SU-105/24	Umidade do ar dentro do duto <u>A</u> - posição de monitoramento 4
106	MT 530	ST-106/25	Temperatura do ar dentro do duto <u>B</u> - posição de monitoramento 4
		SU-106/26	Umidade do ar dentro do duto <u>B</u> - posição de monitoramento 4
107	MT 530	ST-107/27	Temperatura do ar dentro do duto <u>C</u> - posição de monitoramento 4
		SU-107/28	Umidade do ar dentro do duto <u>C</u> - posição de monitoramento 4
AMBIENTE A – CASA VENTURA – ar (ambiente interno)			
108	MT 530	ST-108/29	Temperatura do ar interno do ambiente <u>A</u> – (sensor no ponto central do ambiente)
		SU-108/30	Umidade do ar interno do ambiente <u>A</u> – (sensor no ponto central do ambiente)
AMBIENTE A – CASA VENTURA – ar/água – fan-coil			
204	TC 900	ST-204/31	Temperatura da água dentro do duto - trecho de recalque (próximo ao <i>fan-coil</i>)
		ST-204/32	Temperatura da água dentro do duto - trecho de retorno (próximo ao <i>fan-coil</i>)
205	TC 900	ST-205/33	Temperatura do ar de renovação insuflado no ambiente <u>A</u> (entrada do <i>fan-coil</i>)
		ST-205/34	Temperatura do ar circulante no ambiente <u>A</u> (saída do <i>fan-coil</i>)
AMBIENTE B – CASA VENTURA – ar (ambiente interno)			
109	MT 530	ST-109/35	Temperatura do ar interno do ambiente <u>B</u> – (sensor no ponto central do ambiente)
		SU-109/36	Umidade do ar interno do ambiente <u>B</u> – (sensor no ponto central do ambiente)

A figura 32 mostra o esquema seguido na montagem do sistema de aquisição de dados na experimentação, apresentando a posição relativa dos CDC's, a organização dos controladores e destacando as posições e pontos de monitoramento.

Um corte longitudinal, seguindo aproximadamente o centro geométrico dos dutos enterrados, é mostrado na figura 33, com o objetivo de complementar e facilitar a exposição sobre a montagem do experimento. Aparecem na figura 33, só que em elevação, as posições e pontos de monitoramento da figura anterior. Também são mostrados, na figura 33, os comprimentos aproximados dos trechos de dutos enterrados.

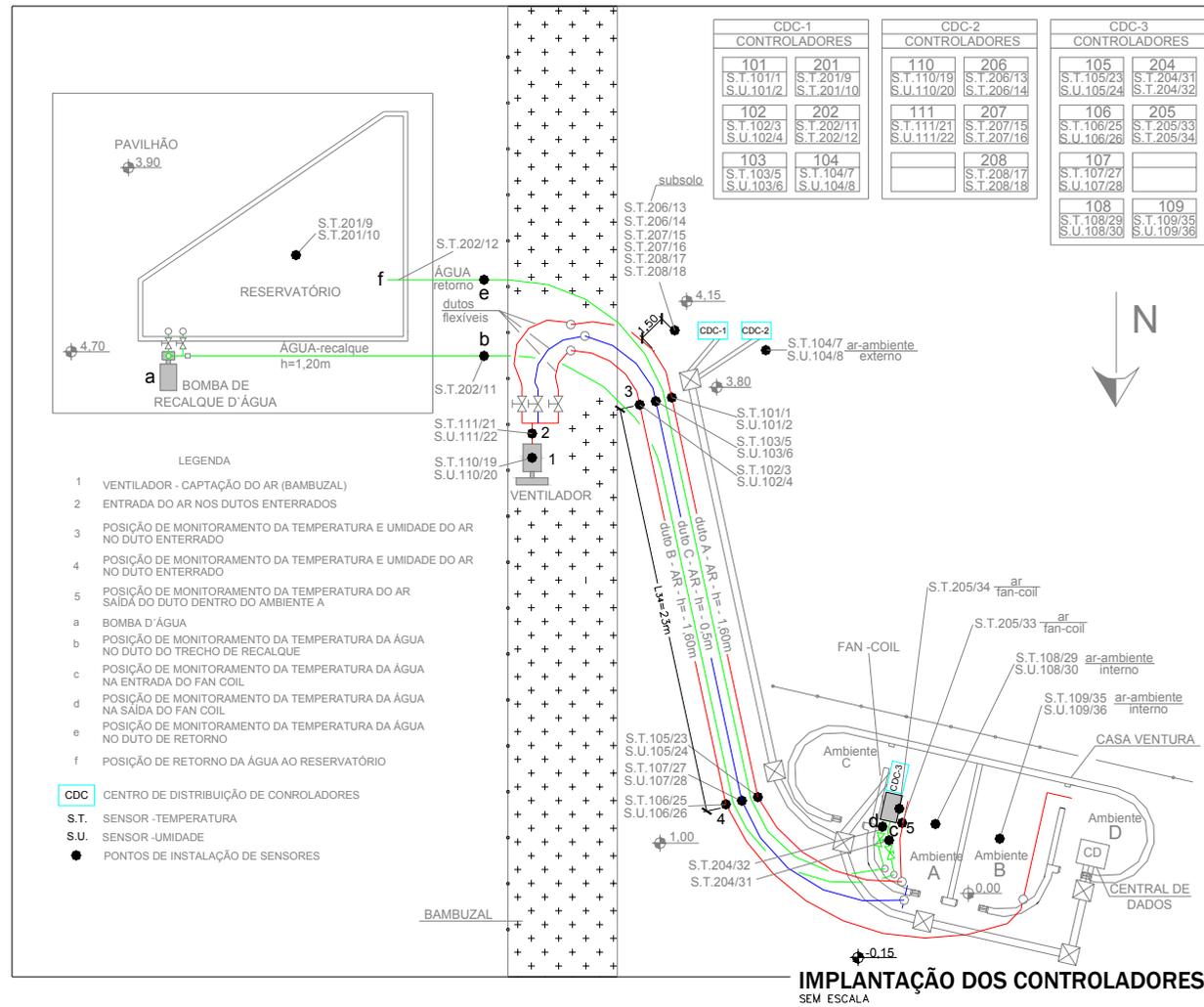


Figura 32: Implantação dos controladores e sensores de temperatura e umidade

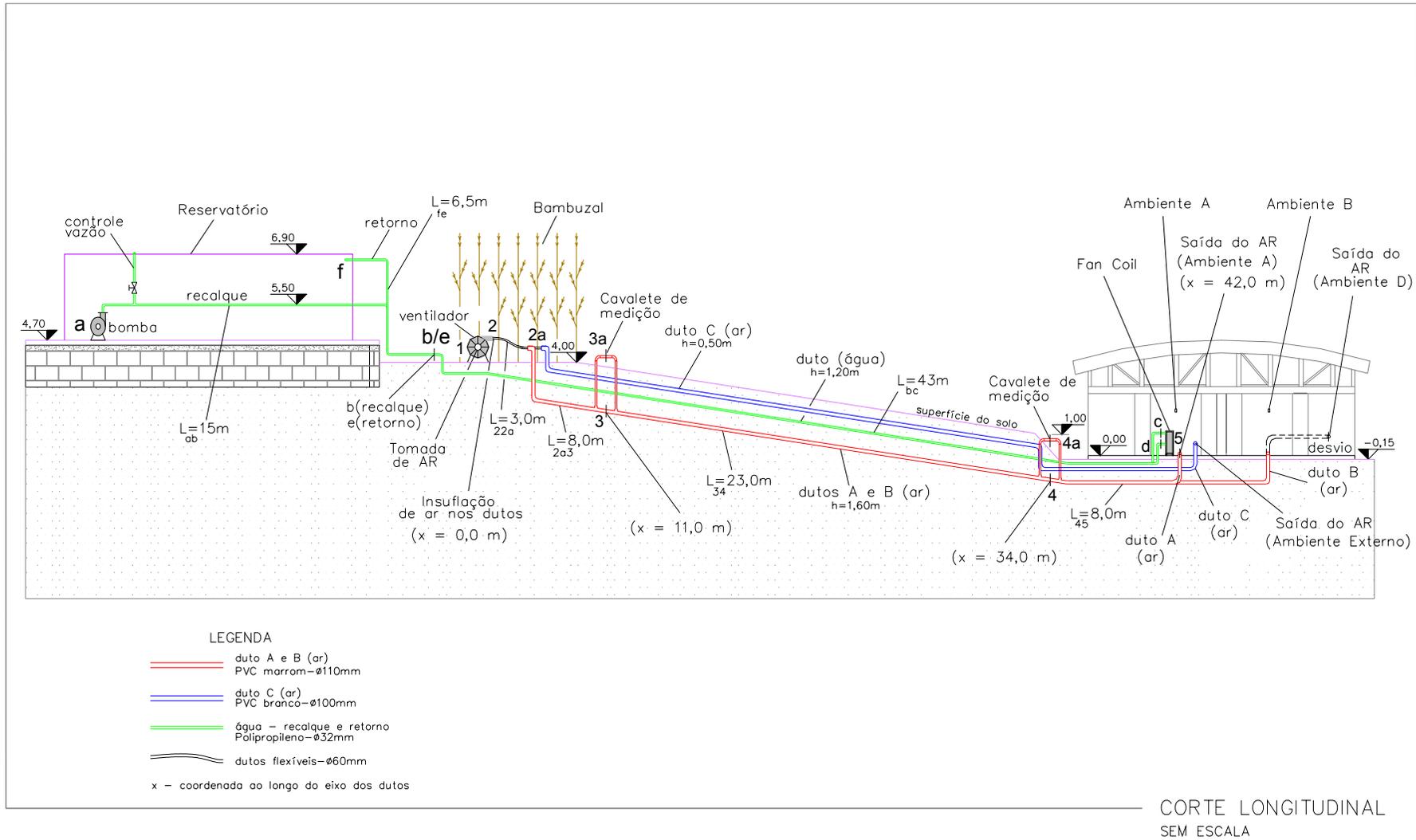


Figura 33: Corte longitudinal – dutos de água e ar

Joaquim Vaz (joaquimvaz@furg.br). Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2011.

4.6.3 Sensores nos trocadores de calor solo-ar

Para leituras de temperaturas e umidades do ar circulante no interior dos dutos enterrados A, B e C foram instalados controladores MT-530, nos centros de distribuição CDC1 e CDC3, correspondendo aos endereços: CDC1 – 101, 102 e 103; e CDC3 – 105, 106 e 107 (ver figura 32).

Visando facilitar a instalação e a possibilidade de intervir nos instrumentos para manutenção, visto que os dutos foram enterrados nas profundidades de 0,50 m e 1,60 m, foram feitas derivações nos dutos (desviadores do ar), na forma de cavaletes, como mostra a figura 34, trazendo os dutos e, em consequência o ar, para a superfície do terreno. Os sensores foram instalados na parte superior dos cavaletes, como mostra a figura 35.

Foram executados 2 grupos de 3 cavaletes: um correspondente aos controladores do CDC1, na posição de monitoramento 3 (ver figura 32) e o outro correspondente aos controladores do CDC3, na posição de monitoramento 4 (ver figura 32). O primeiro grupo de cavaletes corresponde à zona próxima ao ventilador de entrada do ar nos trocadores de calor solo-ar, e o segundo grupo de cavaletes, corresponde à zona próxima à Casa Ventura, de saída do ar dos trocadores de calor solo-ar. O afastamento linear entre estes cavaletes é de, aproximadamente, 23 m (ver figura 33).

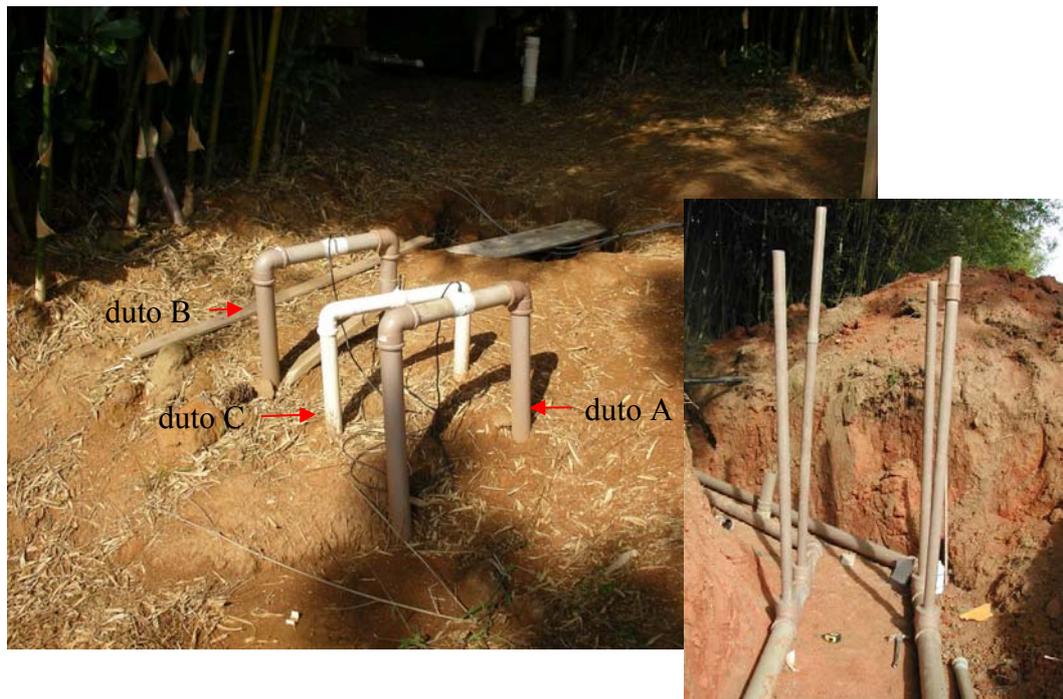


Figura 34: Cavaletes para instalação dos sensores nos dutos de ar

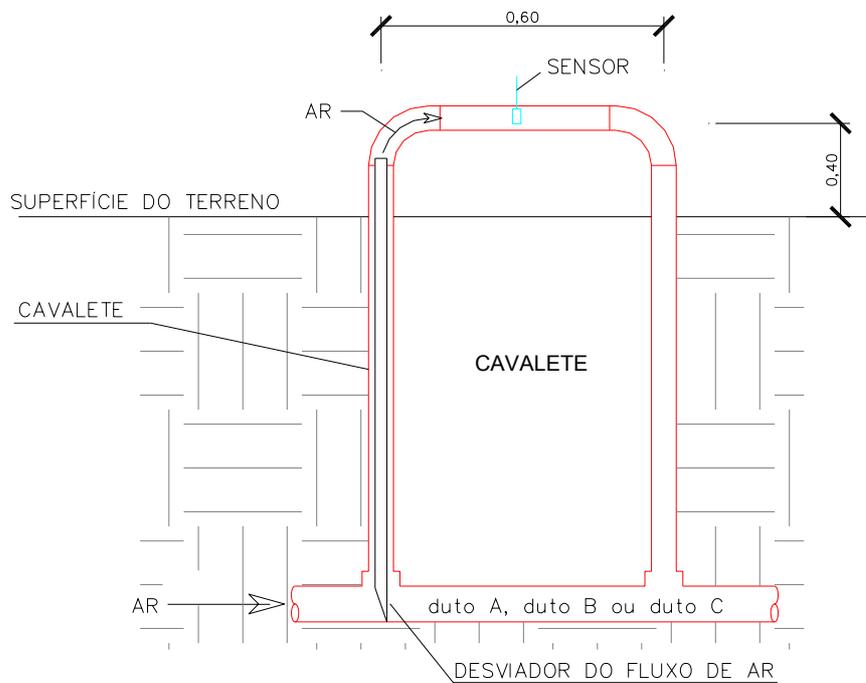


Figura 35: Esquema de montagem do cavalete

Para os dutos A e B, em PVC marrom, enterrados a 1,60 m e com diâmetro de 110 mm, o cavalete foi feito com duto de PVC marrom, de diâmetro 60 mm. Para desviar o fluxo de ar circulante no duto enterrado, para o duto vertical, foi colocado, no interior do duto vertical, um cano de PVC branco, diâmetro 50 mm, com a ponta cortada em chanfro, que se interpõe à seção transversal do duto enterrado, desviando o ar, como mostra o esquema da figura 35. Para o duto C, em PVC branco, enterrado a 0,50 m e com diâmetro de 100 mm, o cavalete foi feito com duto de PVC branco, diâmetro 50 mm e o desviador de fluxo com PVC branco, 40 mm de diâmetro. Os sensores, como já referido, foram instalados na parte central superior dos cavaletes e interligados aos controladores nos correspondentes CDC's. Depois de instalados os sensores, os dutos constituintes da parte superior dos cavaletes foram envolvidos por papel alumínio, visando refletir os raios solares. Além disso, cada conjunto de cavaletes foi coberto por telhas de aço galvanizado, isoladas por chapas de poliuretano (material reciclado).

4.6.4 Sensores no ambiente externo

O sensor de leitura simultânea da temperatura e umidade do ar, do ambiente externo, correspondeu ao controlador MT-530, com endereço 104, no CDC1 (ver figura 32). Visando evitar a possibilidade de um fenômeno localizado de condensação do ar, na superfície do sensor, possível em decorrência de uma estagnação eventual do ar, o sensor foi instalado no interior de um pedaço de cano (0,30 m) de PVC branco, de diâmetro 100 mm (ver figura 36). Acoplado a este cano, em uma de suas extremidades, foi instalado um pequeno ventilador (*cooler*), para movimentar o ar através do cano. A outra extremidade do cano é livre e o sensor foi instalado na parte central do cano, como mostra a figura 36. Este dispositivo foi instalado a 1,80 m de altura e protegido da insolação.

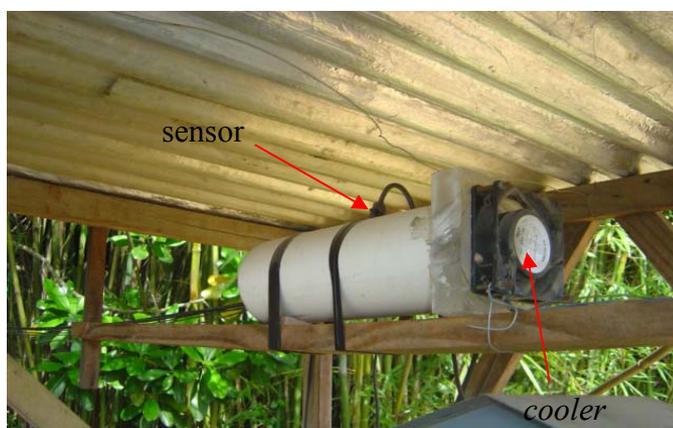


Figura 36: Dispositivo para medida da temperatura e umidade do ar externo

4.6.5 Sensores no reservatório de água

Os dois sensores para leitura da temperatura da massa de água, no interior do reservatório, corresponderam ao controlador TC-900, com endereço 201, no CDC1 (ver figura 32). Visando evitar o contato dos sensores com a água e, também, estabilizar as leituras, usou-se uma bainha metálica para proteção dos sensores, adaptadas (rosca e cola) a um pedaço de cano de polipropileno fechado, como mostra a figura 37. O cano foi colocado, na vertical, no interior do reservatório, no ponto central da área e apoiado no fundo. Um sensor ficou posicionado a 0,30 m do fundo do reservatório e o outro sensor ficou posicionado a 0,80 m mais acima (1,10 m do fundo). Como já referido, a lâmina de água do reservatório, quando cheio, é de 1,80 m. Os cabos de interligação dos sensores ao controlador correspondente saem pelo interior do duto, sem entrar em contato com a água, e foram prolongados até o CDC1.



Figura 37: Bainha metálica para proteção dos sensores no reservatório d'água

4.6.6 Sensores no subsolo

Foram seis os sensores de monitoramento das temperaturas nas camadas inferiores do subsolo, correspondentes aos controladores (TC-900) com endereços 206, 207 e 208, no CDC2 (ver figura 32). Visando evitar o contato do sensor com a umidade do solo, usou-se o mesmo sistema de bainha descrito acima. Um pedaço de cano de polipropileno, com os 6 sensores previamente instalados, foi enterrado, em uma pré-furação vertical no solo, de forma aos sensores ficarem posicionados nas profundidades estabelecidas na pesquisa (0,05 m, 0,30 m, 0,50 m, 1,0 m, 2,0 m e 3,0 m). Na figura 30, é possível observar o afloramento deste cano à superfície do terreno. É possível observar, também, os cabos de interligação dos sensores enterrados aos respectivos controladores no CDC2. O solo retirado na pré-furação foi cuidadosamente reposto no solo, buscando-se reconstituir o maciço, sem deixar vazios no entorno do cano e, também, não danificar as bainhas e sensores, em decorrência do processo de compactação do solo.

4.6.7 Sensores no duto de circulação de água

Foram quatro sensores para o monitoramento das temperaturas da água circulante no interior dos dutos, entre o reservatório e o *fan-coil*, no ambiente A: foram 2 sensores no trecho de recalque da linha, um sensor próximo à bomba e outro sensor ao lado do *fan-coil*; o mesmo aconteceu com o trecho de retorno da água ao reservatório, onde foram instalados os outros 2 sensores. Os sensores corresponderam aos controladores (TC-900), com endereços 202, no CDC1, e 204, no CDC3 (ver figura 32). Os sensores instalados ao lado do *fan-coil*, um no trecho de recalque e o outro no trecho de retorno da água ao reservatório, permitiram avaliar a variação de temperatura da água ao escoar pelo trocador de calor do *fan-coil*. Para evitar o contato do sensor com a água foi usado, também, o sistema de bainha. Neste caso, as bainhas foram instaladas ao contrário, de fora para dentro dos dutos, permitindo os sensores ficarem imersos na água circulante no duto. A distância entre os sensores instalados próximo à bomba e os sensores instalados ao lado do *fan-coil* foi próxima a 43 m (ver figura 33).

4.6.8 Sensores no ventilador – ar do bambuzal

Para monitoramento do ar captado na zona do bambuzal, aproveitou-se o bocal de sucção do ventilador. O sensor, de leitura simultânea de temperatura e umidade, foi instalado diretamente no interior do bocal e correspondeu ao controlador (MT-530), com endereço 110 no CDC2 (ver figura 32). Ao controlador (MT 530), com endereço 111 no CDC2 (ver figura

32), foi associado outro sensor, para monitoramento do ar na saída do ventilador, ou seja, do ar insuflado nos dutos A, B e C. Em ambos os casos, foi realizado um furo na parte superior do duto, para instalação dos sensores: no bocal de sucção, o furo foi feito logo na entrada; e, na insuflação do ventilador, o furo foi feito antes do trecho em que o ar é derivado para os 3 dutos enterrados. Os sensores foram instalados com os centros de suas cápsulas posicionados nos centros das seções transversais dos dutos.

4.6.9 Sensores nos ambientes A e B

Foram dois sensores para leitura das temperaturas e umidades do ar interno nos ambientes A e B, da Casa Ventura, um em cada ambiente. O sensor do ambiente A correspondeu ao controlador (MT-530), com endereço 108; e o sensor do ambiente B correspondeu ao controlador (MT-530), com endereço 109, ambos no CDC3. Os sensores foram instalados no ponto central do volume do ambiente (ver figura 32).

4.6.10 Sensores junto ao *fan-coil* – circulação de ar

Para monitorar a temperatura do ar que circulou pelo *fan-coil* foram usados dois sensores. Como antes descrito, o duto A traz o ar de renovação para o ambiente A e se prolonga horizontalmente junto ao piso do ambiente, até a frente do *fan-coil* e, neste trecho, um rasgo na parte lateral do duto permite ao ar sair para o ambiente. Um sensor foi instalado nesta saída do duto A, ainda dentro do duto, mas bem próximo da grade de entrada do ar na carenagem plástica do *fan-coil*; portanto, os registros se referem à temperatura do ar de renovação, uma fração do ar que passa pelo *fan-coil*. O outro sensor foi instalado junto à grade de saída do ar nesta carenagem. Os sensores correspondem ao controlador (TC-900), com endereço 205, no CDC3 (ver figura 32).

4.6.11 Operação do sistema Sitrad

O sistema Sitrad, de gerenciamento, aquisição e registro dos dados de temperatura e umidade na experimentação, começou a operar no início de julho de 2006, em caráter experimental. O *software* foi programado para adquirir e registrar as temperaturas e umidades a partir dos canais ativos no sistema, a cada 30 min. Vários testes, avaliações localizadas e ajustes nos equipamentos foram feitos. O sistema Sitrad funcionou como esperado, permitindo o acompanhamento e registro dos dados de temperatura e umidade.

Em 26 de setembro, em decorrência de fortes descargas elétricas na atmosfera, o sistema teve vários componentes avariados, incluindo controladores, interface e o próprio computador gerenciador do sistema. Tudo foi corrigido e modificado, visando dar mais segurança ao conjunto de equipamentos, inclusive com a troca do itinerário, e dos próprios cabos bipolares, de interligação das caixas de distribuição dos controladores, à interface e melhoria do sistema de aterramento. Após várias tentativas de corrigir todos os problemas, com períodos intermitentes de medições, o sistema passou a funcionar corretamente no dia 20 de dezembro. Nesta nova fase, todos os sensores estiveram ativos, apresentando, durante o ano de 2007, alguns problemas localizados, que foram sendo acompanhados e resolvidos.

Como já referido, por questões operacionais, o monitoramento do circuito da água não foi contínuo no estudo. Houve dificuldades técnicas em abastecer o reservatório e os registros dos sensores correspondentes aos controladores com endereço 201 e 202, no CDC1, e com endereço 204, no CDC3, foram válidos somente para o período entre 8 de janeiro e 4 de fevereiro de 2007.

Em maio de 2008, alguns sensores, principalmente os enterrados no solo, ainda que com registros contínuos e aparentemente normais, passaram a apresentar pequenas oscilações nos valores medidos, não presentes antes, quando grafados em relação tempo.

Para a etapa do processo de análise dos resultados da experimentação, pela descrição acima, a etapa de aquisição e registro dos dados foi considerada abrangente ao ano de 2007, perfazendo 365 dias. Os registros anteriores e posteriores foram desconsiderados.

4.7 VAZÃO DE AR NOS DUTOS ENTERRADOS

Para avaliar a vazão do ar nos dutos enterrados foi usado um anemômetro de fio quente, fabricado pela INSTRUTEMP, regulado para a escala de 0,4 – 12 m/s. A precisão do equipamento é de $\pm 2\%$.

Em cada duto, a velocidade do ar foi medida segundo duas direções perpendiculares entre si, em relação à secção transversal, e em nove posições, em cada direção. Para cada situação de medida foram feitas três leituras. Os valores médios destas leituras foram usados para avaliar a vazão do ar nos dutos.

As avaliações foram feitas com o ventilador insuflando ar, simultaneamente, nos dutos A, B e C, no final do mês de dezembro de 2006 e repetidas em janeiro de 2007 (ver figuras 23 e 24). Para permitir o acesso da sonda do equipamento ao interior do duto, para as leituras, foram feitos furos nos dutos. Os pontos definidos foram: para os dutos A e B, foram escolhidos pontos na região de afloramento do duto, no piso interior dos respectivos ambientes A e B, da Casa Ventura (para o duto A, ver figura 18); e para o duto C, que aflora à superfície do solo no ambiente externo a Casa Ventura, mas num ponto junto à parede externa do ambiente A (ver figura 22), o ponto de leitura escolhido foi nesta região de afloramento.

4.8 VAZÃO DE ÁGUA NO *FAN-COIL*

Como já referido, a água do reservatório foi circulada em uma rede de dutos de polipropileno (32 mm) até o *fan-coil*, instalado no ambiente A, da Casa Ventura, sob a pressão de uma bomba. No trecho de recalque da rede, ainda perto da bomba, como também já referido, foi intercalada uma derivação na linha, regulada por um registro, que retorna parte da água para o reservatório, compondo um sistema de controle da vazão d'água na rede e, por consequência, no trocador de calor do *fan-coil*. Fechando o registro, menos água retorna ao reservatório e aumenta a vazão d'água no trocador de calor e, abrindo o registro, ocorre o contrário. O esquema da figura 33 mostra este dispositivo.

A avaliação da vazão d'água na rede foi feita com auxílio de um rotâmetro¹² de linha, instalado no trecho de recalque da água, na entrada da rede no ambiente A, da Casa Ventura, conforme mostra a figura 38. A vazão d'água foi controlada somente entre os dias 8 de janeiro e 4 de fevereiro de 2007, quando foi possível colocar em funcionamento o sistema de circulação da água no experimento.

¹² O rotâmetro usado na experimentação é de fabricação da Blue-White Industries. É um rotâmetro digital de linha com leitura em litros por minutos (LPM), de propriedade do laboratório LEPTA da PUC/RS e repassado para a pesquisa.



Figura 38: Rotâmetro de linha, usado no experimento

5 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo inicia abordando as propriedades térmicas do solo de Viamão, de interesse às análises subsequentes no texto. Entre elas, a **capacidade térmica**, que indica a quantidade de calor necessária para produzir determinada variação térmica no solo, a **condutividade térmica**, que expressa a habilidade do solo em conduzir o calor, e a **difusividade térmica**, que indica como o calor se difunde no solo.

Na sequência, são apresentados os dados monitorados na etapa experimental do estudo e se discutem os fenômenos neles embutidos, os quais transpareceram nas análises realizadas. Todos os processos, como já referido, estão associados ao monitoramento da temperatura e umidade do ar do ambiente externo em Viamão, da temperatura e umidade dos ambientes internos da Casa Ventura (ambientes A e B), da temperatura e umidade do ar ambiente na área do bambuzal, da temperatura da massa d'água do reservatório; da temperatura, umidade e vazão do ar circulante no interior dos dutos enterrados (dutos A, B e C); da temperatura e vazão da água circulante entre o reservatório e o *fan-coil* colocado no ambiente A da Casa Ventura; e da temperatura do subsolo, nas profundidades de 0,05 m, 0,30 m, 0,50 m, 1,0 m, 2,0 m e 3,0 m.

Por fim, com base nas propriedades do solo e nos dados monitorados na pesquisa, são apresentados perfis típicos da variação de temperatura no solo, com a profundidade, para alguns dias do ano de 2007.

5.1 DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO SOLO

A difusividade térmica é uma variável importante na variação de temperatura do solo. Esta propriedade permite estimar o quão rapidamente o solo se ajusta por inteiro à temperatura em sua superfície ou em seu interior.

Conforme o capítulo 3, no qual foi abordado o regime térmico do solo, a difusividade térmica pode ser avaliada pela equação da amplitude, equação (3.45), a partir da relação entre amplitudes da variação de temperatura, em diferentes profundidades no solo ou, alternativamente, pela equação da fase, equação (3.48), a partir da diferença entre tempos de ocorrência de eventos máximos de temperatura, em diferentes profundidades no solo. Ambas as equações derivam da equação da difusão do calor no solo, equação (3.37).

Para avaliar a difusividade térmica do solo, previamente na pesquisa, foram usadas estas equações, junto com dados de temperatura do solo de Viamão, obtidos da FEPAGRO/RS. A Unidade de Viamão, desta Fundação, manteve em funcionamento, entre março de 1980 e setembro de 1988, o monitoramento de vários parâmetros meteorológicos, incluindo temperaturas do solo, para diferentes profundidades. Os registros foram feitos em três horários diários: 9 h, 15 h e 21 h. Para o solo, as temperaturas foram registradas nas profundidades de 0,05 m, 0,10 m, 0,15 m, 0,30 m e 0,50 m. Os dados foram gentilmente cedidos pela FEPAGRO para a pesquisa.

Como é possível observar, os 3 registros não têm distribuição temporal uniforme no período diário. Desta forma, os valores médios e amplitudes calculadas, para cada parâmetro considerado, não representam os valores médios e amplitudes diárias destes parâmetros. Isto não se mostrou como limitação ao estudo, dado que, como referido acima, o objetivo foi usar estes dados para avaliar a difusividade térmica do solo, a partir das equações (3.45) e (3.48), respectivamente, equação da amplitude e da fase. Observa-se, nestas equações, que a difusividade térmica do solo depende das diferenças entre amplitudes ou fases, e não das amplitudes e fases, diretamente.

Admitindo que estas diferenças entre amplitudes ou fases, calculadas com os 3 registros diários, têm boa aproximação com as diferenças que seriam as corretas, ou seja, obtidas de registros com distribuição temporal uniforme, no período diário, os dados da FEPAGRO foram usados na avaliação preliminar da difusividade térmica do solo de Viamão, como se descreve a seguir.

Visando, então, determinar as amplitudes e fases das distribuições temporais de temperaturas do solo, foram ajustadas curvas aos dados da FEPAGRO, para as 5 profundidades definidas anteriormente. Tendo por referência a equação da difusão do calor, equação (3.37), foi usado um modelo não linear de regressão, baseado na técnica de Gauss-Newton. As funções a serem estimadas foram propostas na forma da equação a seguir, sendo 21,5 °C o valor médio do ciclo anual das temperaturas no solo (obtido pela média dos valores médios, da temperatura do solo, nas 5 profundidades analisadas) e os parâmetros Θ_z , e Γ_z , a amplitude e a fase, respectivamente, da distribuição temporal de temperaturas, para cada profundidade, z , analisada. O ciclo diário de temperaturas no solo não foi considerado. A figura 39 mostra as curvas ajustadas, incluindo as equações obtidas para cada profundidade, e a tabela 8 resume os valores encontrados.

$$T(t) = 21,5 + \Theta_z \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot t + \Gamma_z\right) \quad (5.1)$$

A partir das amplitudes e fases da tabela 8 foi avaliada a difusividade térmica (α) do solo de Viamão, com o uso da equação da amplitude, equação (3.45) e da equação da fase, equação (3.48), reorganizadas como apresentado a seguir, respectivamente:

$$(z_2 - z_1) = \left(\frac{365}{\pi}\right)^{1/2} \cdot (\alpha)^{1/2} \cdot \ln\left(\frac{\Theta_{z_1}}{\Theta_{z_2}}\right) \quad (5.2)$$

$$(z_2 - z_1) = \left(\frac{365}{\pi}\right)^{1/2} \cdot (\alpha)^{1/2} \cdot |\Gamma_{z_2} - \Gamma_{z_1}| \quad (5.3)$$

Para a avaliação, admitiram-se 10 camadas no solo, combinando as 5 profundidades nas quais as temperaturas foram registradas. A tabela 9 resume os valores obtidos.

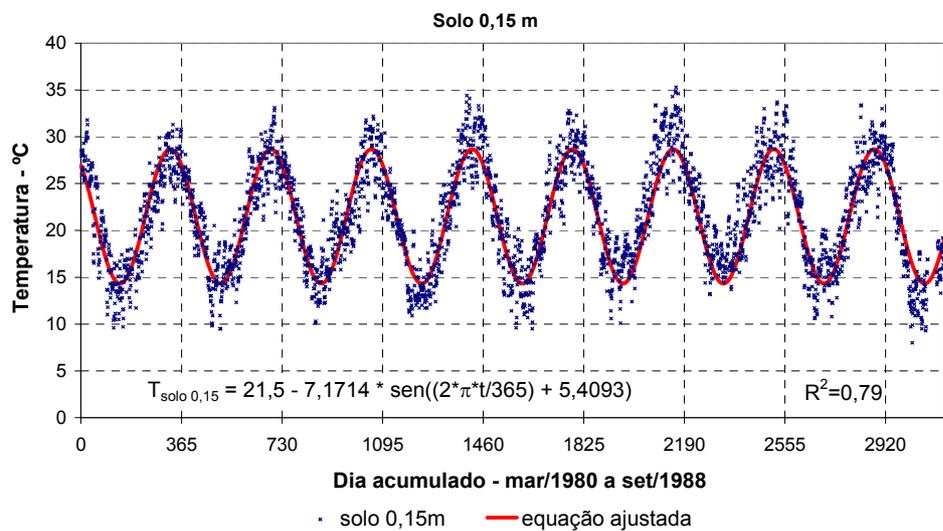
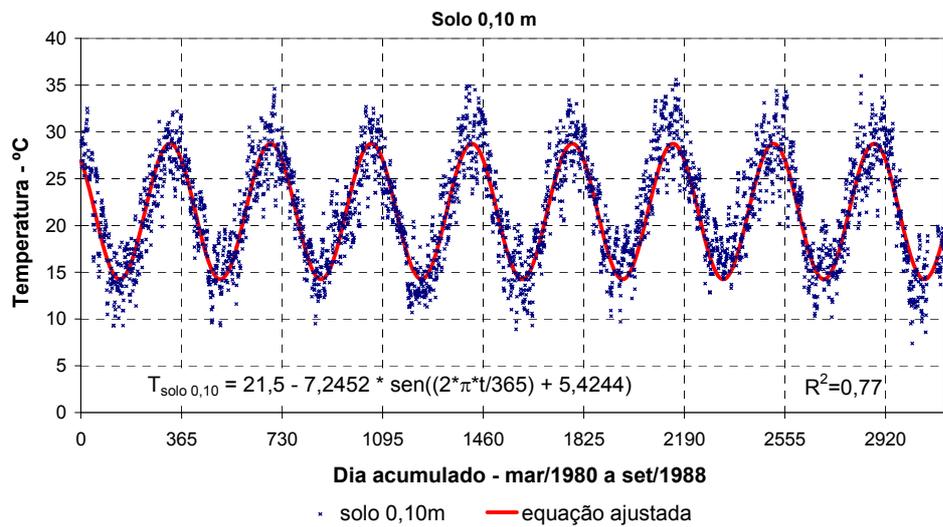
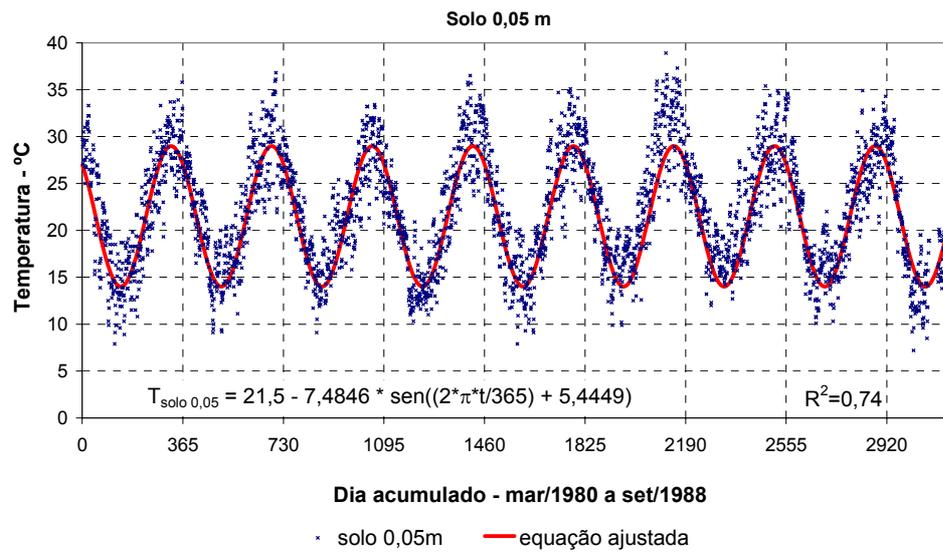


Figura 39 (continua)

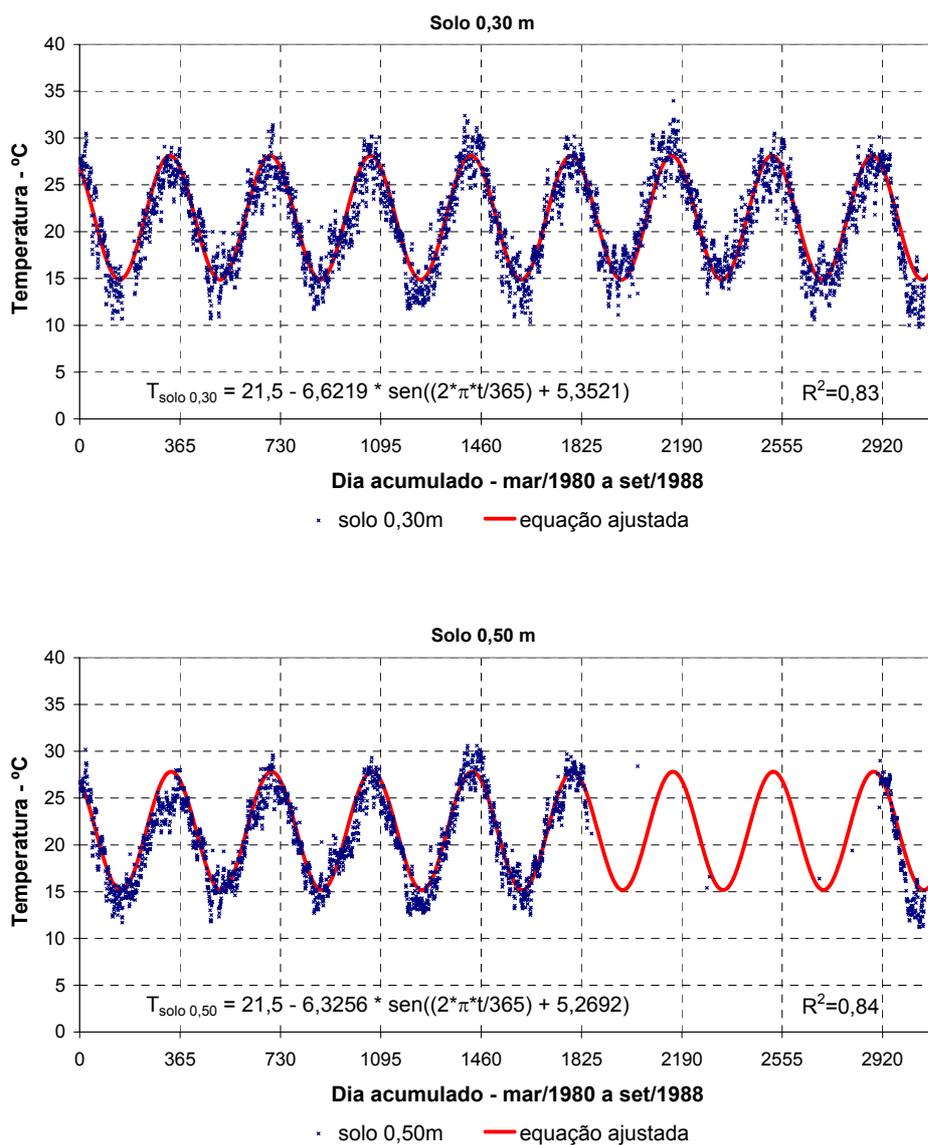


Figura 39: Variações de temperaturas no solo de Viamão – FEPAGRO

Tabela 8: Amplitudes e fases das funções de temperatura no solo

Profundidade (m)	Θ_z (K)	Γ_z (rd)	R^2
0,05	-7,4846	5,4449	0,74
0,10	-7,2452	5,4244	0,77
0,15	-7,1714	5,4093	0,79
0,30	-6,6219	5,3521	0,83
0,50	-6,3256	5,2692	0,84

Tabela 9: Variações de amplitudes e fases nas camadas de solo

Camada	z_1 (m)	z_2 (m)	$z_2 - z_1$ (m)	Θ_1 (K)	Θ_2 (K)	$\ln\left(\frac{\Theta_1}{\Theta_2}\right)$	Γ_1 (rd)	Γ_2 (rd)	$ \Gamma_2 - \Gamma_1 $ (rd)
1	0,05	0,10	0,05	-7,4846	-7,2452	0,0325	5,4449	5,4244	0,0205
2	0,05	0,15	0,10	-7,4846	-7,1714	0,0427	5,4449	5,4093	0,0356
3	0,05	0,30	0,25	-7,4846	-6,6219	0,1225	5,4449	5,3521	0,0928
4	0,05	0,50	0,45	-7,4846	-6,3556	0,1635	5,4449	5,2692	0,1757
5	0,10	0,15	0,05	-7,2452	-7,1714	0,0102	5,4244	5,4093	0,0151
6	0,10	0,30	0,20	-7,2452	-6,6219	0,0899	5,4244	5,3521	0,0723
7	0,10	0,50	0,40	-7,2452	-6,3556	0,1310	5,4244	5,2692	0,1552
8	0,15	0,30	0,15	-7,1714	-6,6219	0,0797	5,4093	5,3521	0,0572
9	0,15	0,50	0,35	-7,1714	-6,3556	0,1208	5,4093	5,2692	0,1401
10	0,30	0,50	0,20	-6,6219	-6,3556	0,0410	5,3521	5,2692	0,0829

Usando um modelo de regressão, foram ajustadas funções aos parâmetros, uma para cada caso, conforme mostra a figura 40. As funções mostraram-se como retas, com declividades iguais à difusividade térmica média anual do solo.

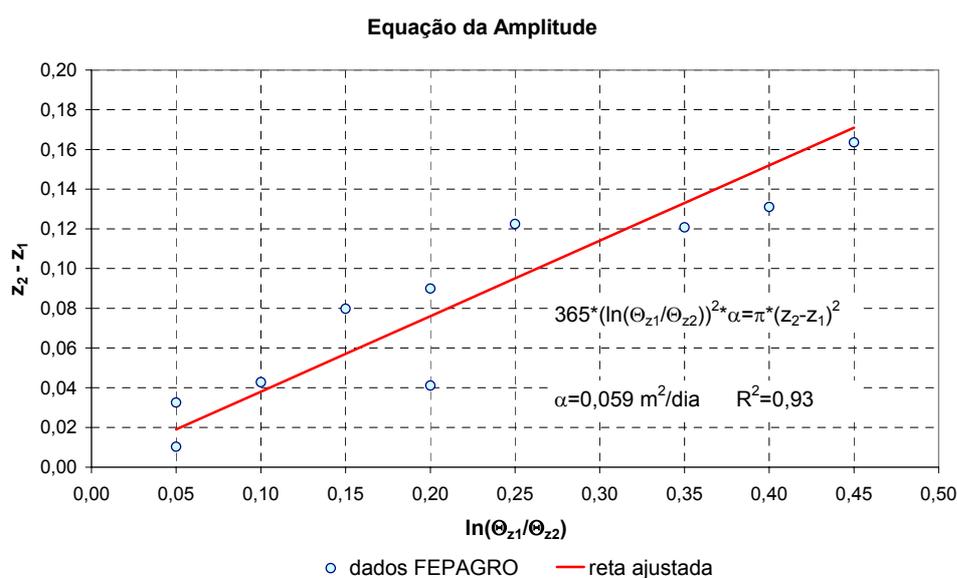


Figura 40 (continua)

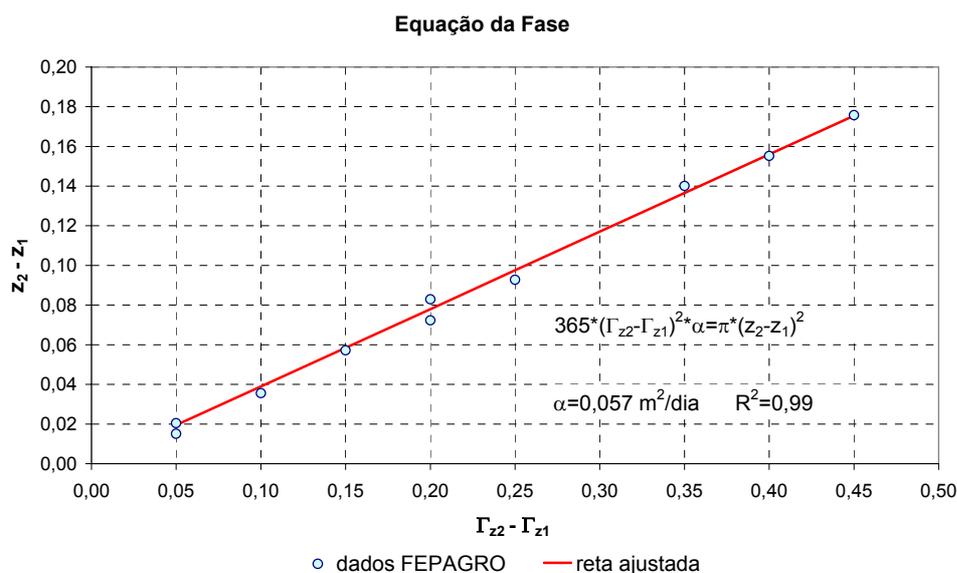


Figura 40: Difusividade térmica do solo de Viamão

Para a equação da amplitude, o valor da difusividade mostrou-se igual a 0,059 m²/dia, enquanto, para a equação da fase, a difusividade ficou em 0,057 m²/dia. Para solo argiloso, a literatura recomenda valores da difusividade variando entre 0,042 m²/dia e 0,061 m²/dia (ASHRAE, 2000). Na pesquisa, a difusividade térmica do solo de Viamão foi admitida igual a 0,057 m²/dia.

5.2 CAPACIDADE TÉRMICA VOLUMÉTRICA DO SOLO

A capacidade térmica volumétrica do solo pode ser determinada pela adição das capacidades térmicas das diversas fases que constituem o solo. Conforme o Manual de Sistemas e Equipamentos da ASHRAE (2000), a capacidade térmica volumétrica do solo pode ser expressa pela equação:

$$C_s = \rho_s \cdot \left(c_{s0} + c_w \cdot \left(\frac{w}{100} \right) \right) \quad (5.4)$$

onde, C_s , é a capacidade térmica volumétrica do solo (kJ/m³.K); ρ_s , a massa específica do solo (kg/m³); c_{s0} , o calor específico do solo seco (kJ/kg.K); c_w , o calor específico da água (4,18 kJ/kg.K) e w , o conteúdo de umidade no solo (% , em base seca).

O calor específico de solos secos é aproximadamente constante, para todos os tipos de solo, e c_{s0} pode ser feito igual ao valor médio 0,73 kJ/kg.K. Como apresentado no sub-capítulo 4.5, quando do estudo dos índices do solo de Viamão, a massa específica varia com a profundidade, sendo admitido na pesquisa o valor médio de 1.800 kg/m³. Com o teor de umidade do solo, de 25 %, e os valores acima, a capacidade térmica do solo de Viamão foi estimada com valor médio de 3.200 kJ/m³.K.

5.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO

A condutividade térmica do solo está relacionada com a difusividade térmica e a capacidade térmica volumétrica do solo, a partir da equação (ASHRAE, 2000):

$$k_s = \left(\frac{\alpha \cdot C_s}{86,4} \right) \quad (5.5)$$

onde, k_s é a condutividade térmica do solo (W/m.K); α , a difusividade térmica do solo (m²/dia) e C_s , a capacidade térmica volumétrica do solo (kJ/m³.K).

Com o valor da difusividade térmica do solo, avaliado anteriormente em 0,057 m²/dia, a condutividade térmica do solo de Viamão, na pesquisa, foi estimada com valor médio de 2,1 W/m.K.

5.4 VAZÃO DE AR NOS TROCADORES DE CALOR SOLO-AR

Como referido antes no texto, os trocadores de calor solo-ar, na pesquisa, eram constituídos por três dutos (dutos A, B e C) enterrados no solo, interligando a posição de tomada do ar externo, feita com um ventilador colocado na área do bambuzal, e os ambientes da Casa Ventura, nos quais este ar foi insuflado. Os registros das velocidades do ar, no interior dos dutos, foram usados no estudo para avaliar as vazões do ar em escoamento nos dutos.

As medições das velocidades, conforme descrito no sub-capítulo 4.7, foram realizadas com o ventilador soprando ar, simultaneamente, para os três dutos. Para cada medição, a secção diametral do duto foi dividida em 9 partes, segundo 2 direções perpendiculares, gerando 18 posições, nas quais as velocidades foram avaliadas em três leituras consecutivas. A figura 41 ilustra as posições de medidas. Após, para cada duto, foram determinadas as médias

ponderadas dos valores, em cada posição, considerando a área de influência de cada medida na seção transversal do duto, obtendo-se na sequência as correspondentes vazões. As áreas das seções transversais dos dutos, as velocidades médias do ar e vazões correspondentes, estão sumarizadas na tabela 10.

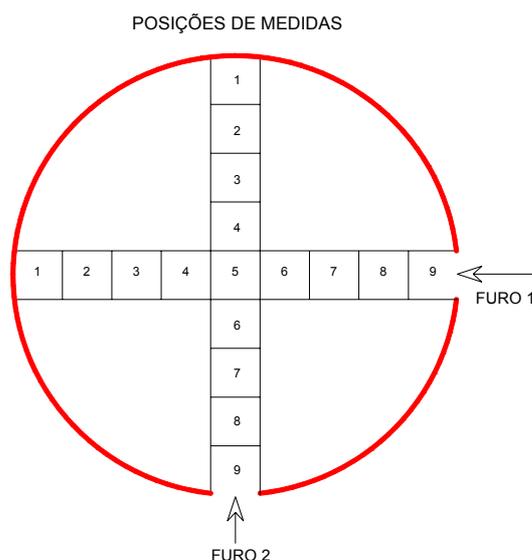


Figura 41: Posições de medidas da velocidade do ar nos dutos

Tabela 10: Velocidades e vazões do ar nos trocadores de calor solo-ar

Duto	Material	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	Vazão (m³/h)
<u>A</u>	PVC - marron	110	3,3	88,1
<u>B</u>	PVC - marron	110	3,6	98,0
<u>C</u>	PVC - branco	100	2,5	72,0

Conforme se observa na tabela 10, as velocidades médias de escoamento do ar nos dutos A, B e C foram, respectivamente, 3,3 m/s, 3,6 m/s e 2,5 m/s. As velocidades diferentes nos dutos se justificam pela distribuição excêntrica do ar na saída do ventilador, conforme mostra a figura 23.

Os dutos A e B, em PVC marrom, eram de diâmetro nominal 110 mm e o duto C, em PVC branco, era de diâmetro nominal de 100 mm. As vazões correspondentes foram 88,1 m³/h, 98,0 m³/h e 72,0 m³/h.

5.5 VAZÃO DE ÁGUA NO *FAN-COIL*

A vazão de água na tubulação que interligou o reservatório e o *fan-coil* colocado no ambiente A, da casa Ventura, como já descrito no sub-capítulo 4.8, foi regulada com auxílio de uma derivação feita no trecho de recalque da água. Como antes referido, esta derivação, dotada de um registro, permitia o retorno de parte da água, pressurizada pela bomba, ao reservatório, sem circular no sistema, de forma a controlar a vazão de água no *fan-coil*.

No início de janeiro de 2007, quando do início da circulação de água no experimento, o registro da derivação foi posicionado para que a vazão na linha ficasse em torno de 10 lpm (litros por minuto).

Por meio do rotâmetro colocado na linha (ver figura 38), próximo ao *fan-coil*, no ambiente A, foram feitas sucessivas observações da vazão de água no sistema, entre 8 de janeiro e 4 de fevereiro. Os valores observados se estabeleceram em torno da média de 9,6 lpm.

5.6 DADOS DE TEMPERATURA E UMIDADE

Como já referido, o programa Sitrad foi usado para a gerência das leituras e registros dos dados de temperatura e umidade no experimento. Relembrando, no ano de 2007, a cada trinta minutos, foram feitos registros para os sensores ativados. Os controladores MT530 registraram, cada um, a partir de um único sensor, leituras simultâneas e correspondentes de temperatura e umidade. Os controladores TC900 registraram, cada um, a partir de dois sensores distintos, leituras de temperaturas.

Os dados foram organizados em tabelas: em uma tabela foram juntados, em colunas sequentes, os registros correspondentes aos controladores MT-530; e em outra tabela, foram juntados, também em colunas sequentes, os registros correspondentes aos controladores TC-900. Na sequência, os dados foram reorganizados em linhas, com cada linha correspondendo aos registros de um dia, o que possibilitou avaliar valores diários máximos, mínimos e médios.

Seguindo os registros, organizados como descrito acima, na sequência do texto são apresentados e analisados os gráficos das variações temporais dos registros de temperatura, correspondentes aos sensores ativos no experimento. Considerando a possibilidade de ocorrência de condensação do ar, durante todo o período de monitoramento de dados na pesquisa, foram periodicamente vistoriadas as entradas e saídas de ar, nos dutos enterrados e nos ambientes internos, incluindo o *fan-coil* colocado no ambiente A. Não foi identificada nenhuma evidência do fenômeno, o que justificou desconsiderá-lo nas análises.

5.6.1 Dados do ar do ambiente externo

A figura 42 mostra a distribuição de temperaturas do ar ambiente, externo à Casa Ventura, no ano de 2007, monitorada a partir do sensor ST-104/7, na pesquisa. Os valores variaram entre os extremos $-1,0\text{ °C}$ e $36,5\text{ °C}$. A curva ajustada aos registros horários de temperatura, usando a técnica dos mínimos quadrados, é mostrada na figura, indicando um valor médio da temperatura de $18,8\text{ °C}$ e amplitude de $6,2\text{K}$. O grau de ajuste do modelo senoidal proposto foi $R^2 = 0,65$.

Continuando as informações sobre a temperatura do ar ambiente de Viamão, na figura 43 se apresentam as temperaturas máximas e mínimas diárias, bem como se mostram as curvas ajustadas a estas distribuições e a diferença entre elas. A média dos valores máximos e mínimos foram $24,4\text{ °C}$ e $14,4\text{ °C}$, respectivamente. Como as amplitudes tiveram valores próximos, $7,0\text{K}$ e $5,8\text{K}$, respectivamente, esta diferença entre os valores máximos e mínimos diários se manteve em torno dos 10K , com valor mínimo de $8,3\text{K}$, no período frio e valor máximo de $11,5\text{K}$, no período quente.

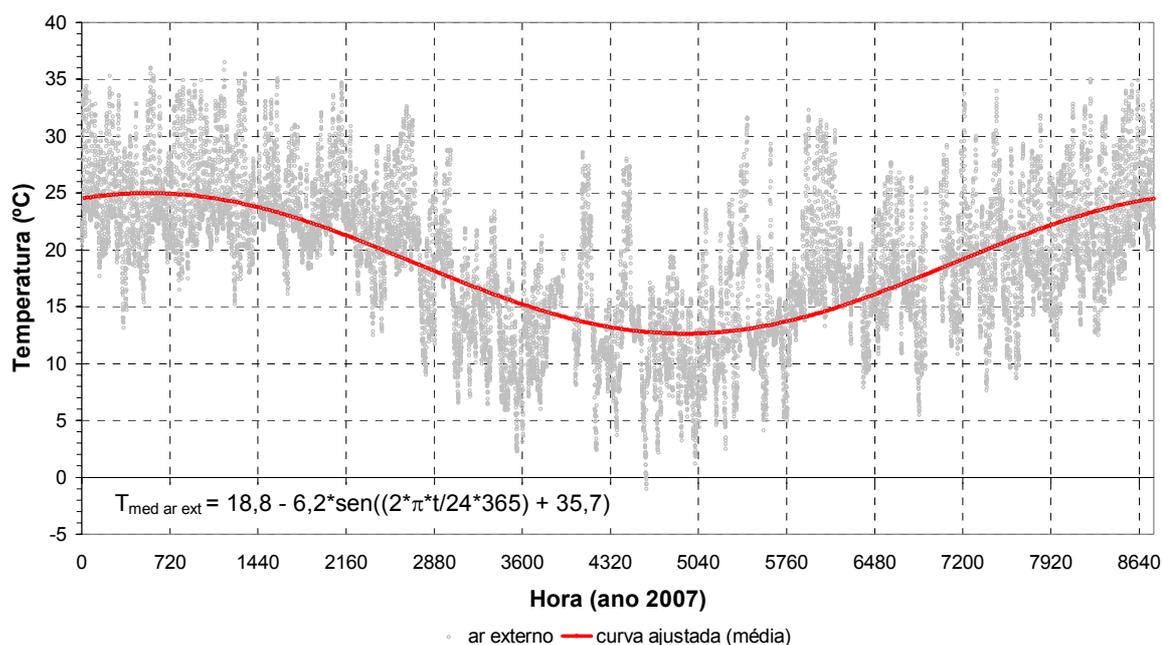


Figura 42: Variação da temperatura do ar ambiente de Viamão

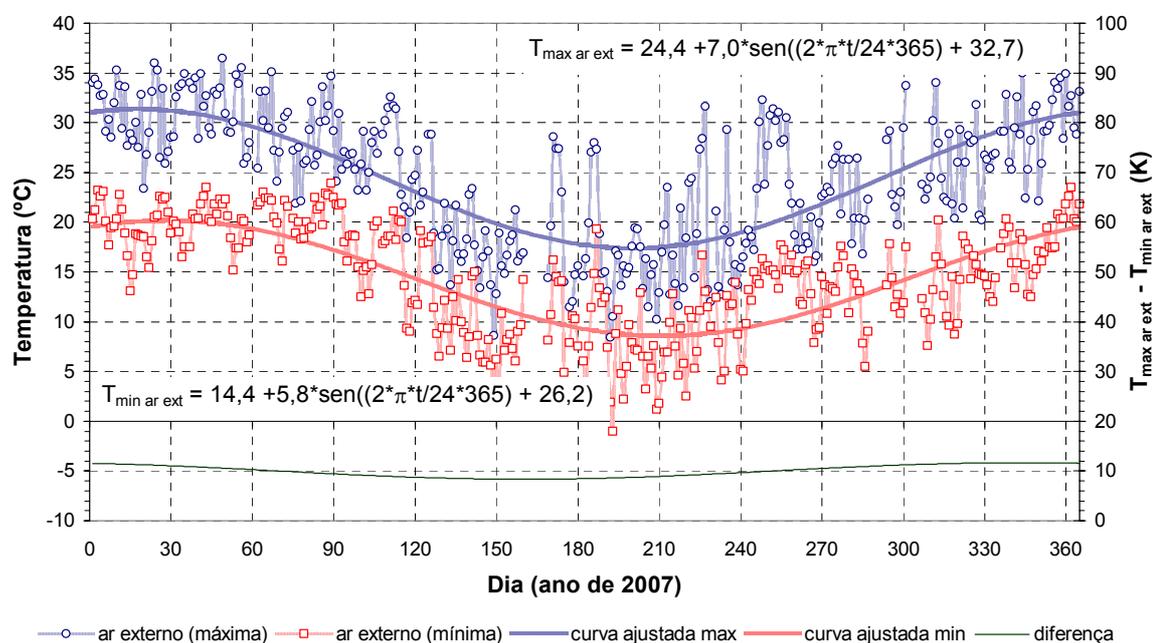


Figura 43: Temperaturas máximas e mínimas diárias do ar ambiente de Viamão

Seguindo a apresentação dos dados diários do ambiente de Viamão, na figura 44 mostra-se a variação da umidade relativa do ar ambiente externo, durante o ano de 2007, obtida a partir dos registros do sensor SU-104/8, na pesquisa. São valores médios diários, que revelam a umidade relativa oscilando entre os limites de 44 % e 98 %.

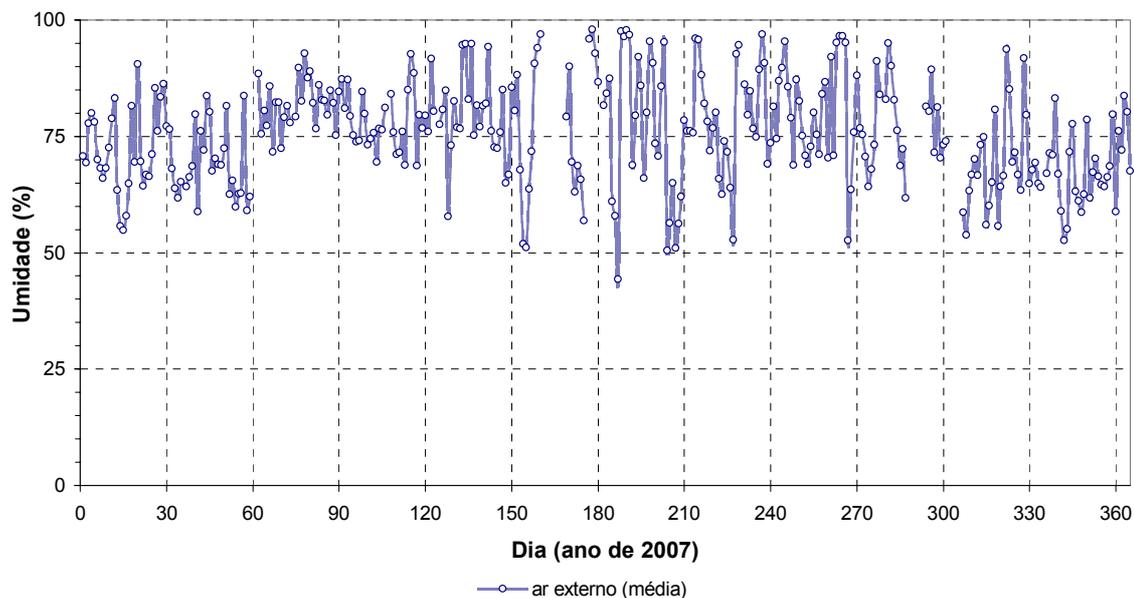


Figura 44: Valores médios diários da umidade relativa do ar ambiente de Viamão

Complementando as informações sobre o ar ambiente externo de Viamão, a figura 45 mostra a distribuição horária de temperatura, para alguns dias escolhidos, ao acaso, na pesquisa. Aos valores monitorados foram ajustadas curvas senoidais, as quais também são mostradas na figura, incluindo suas respectivas equações.

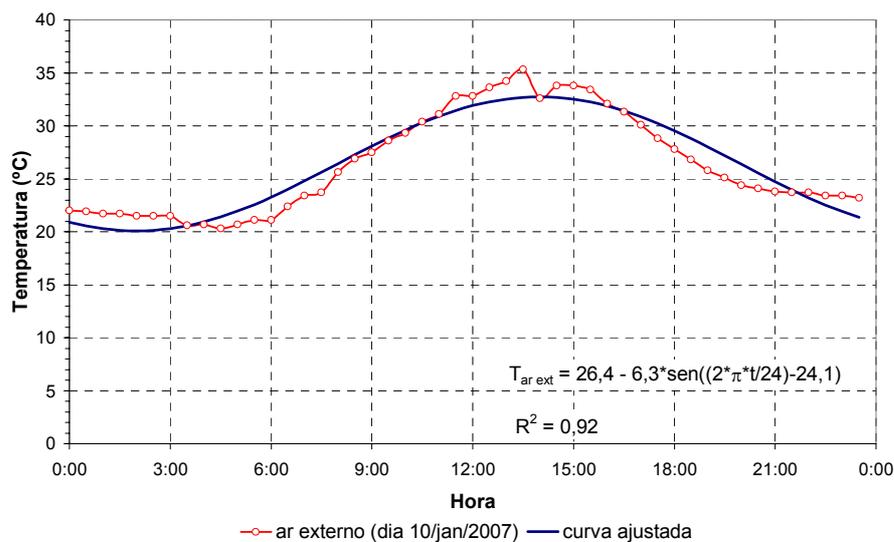


Figura 45 (continua)

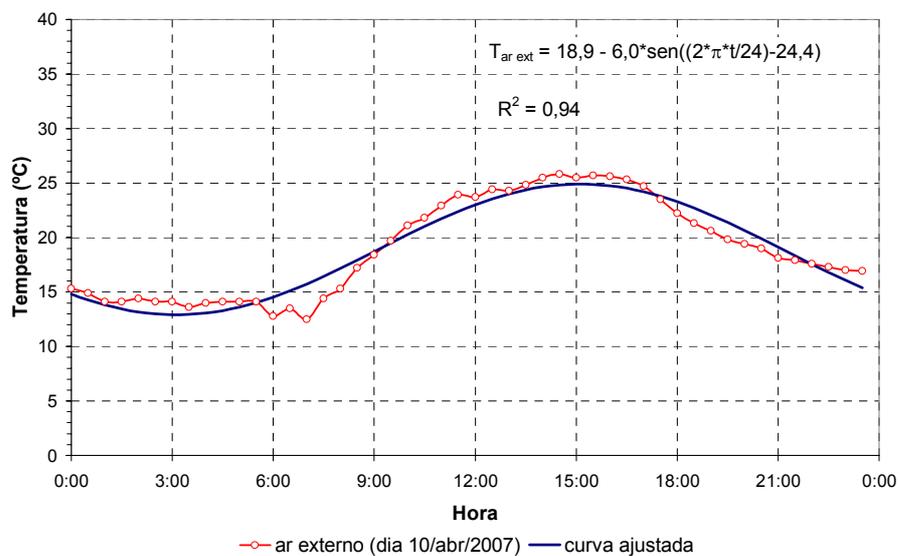
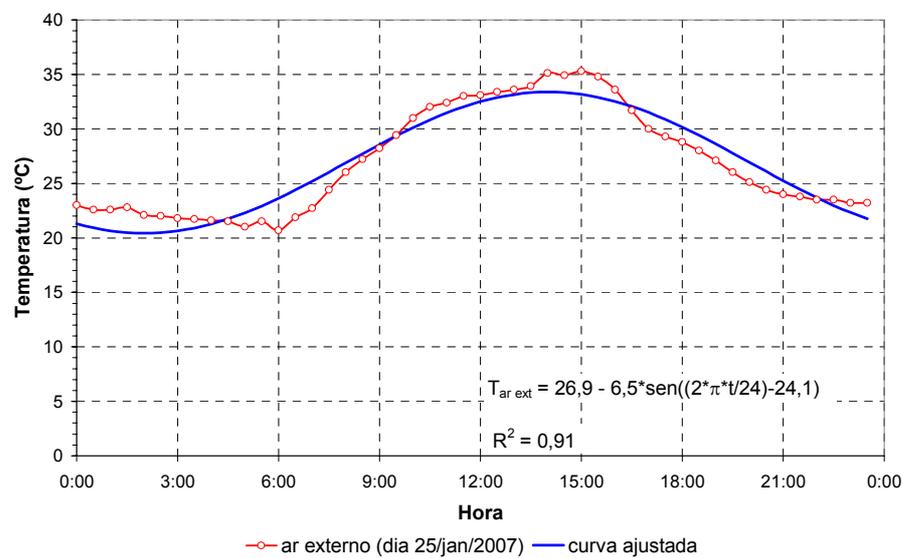
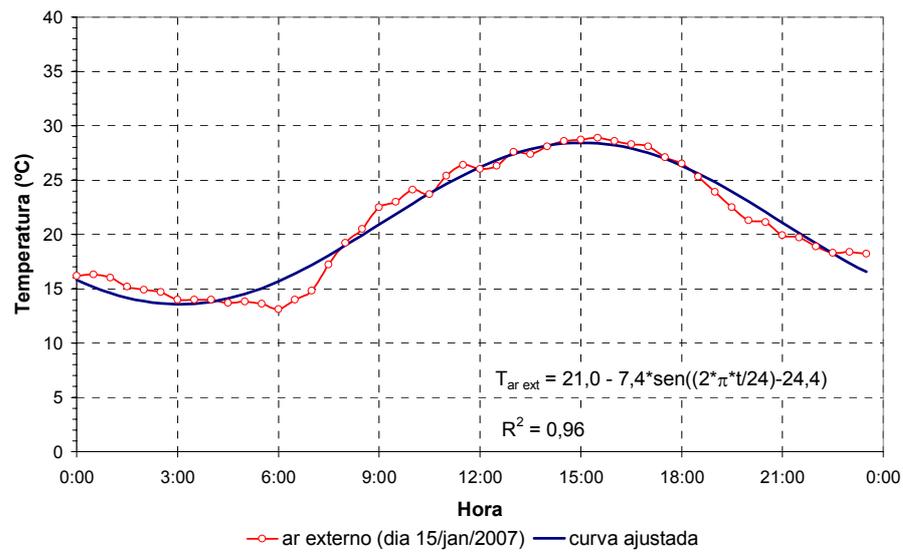


Figura 45 (continua)

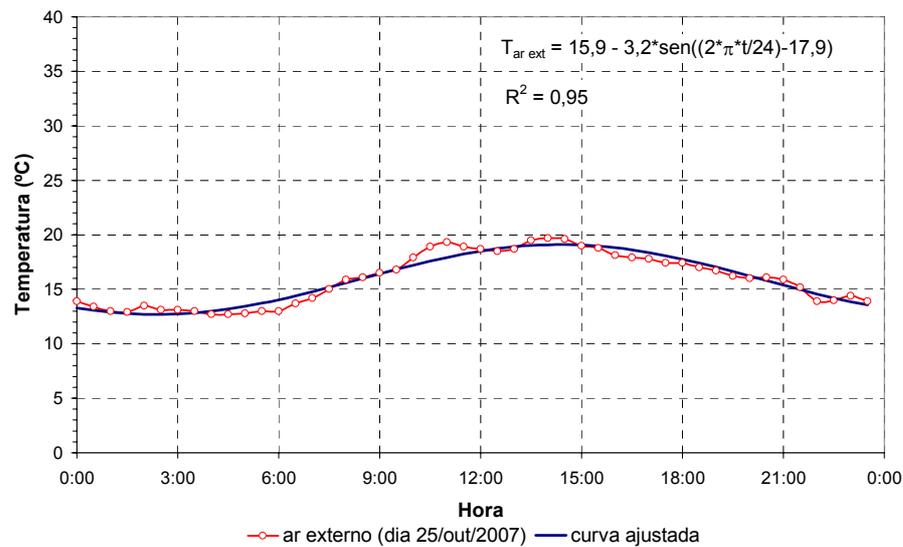
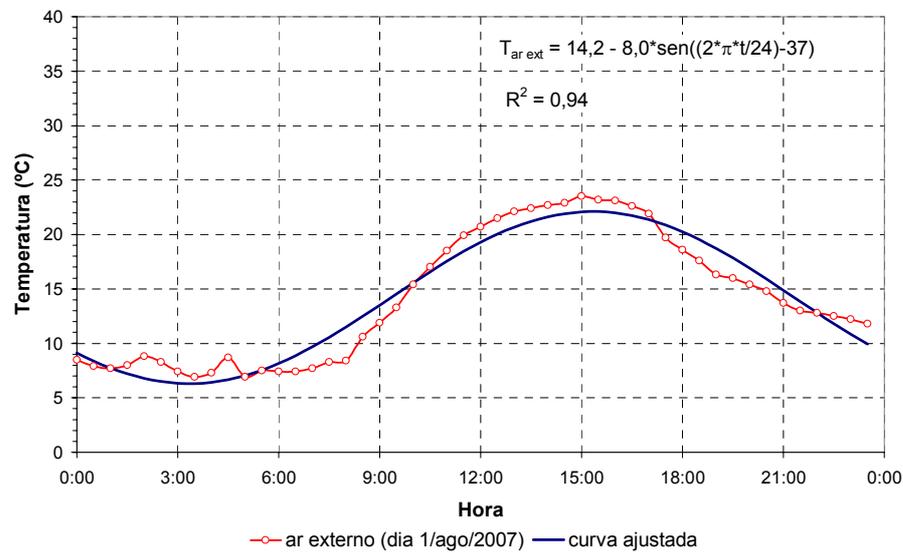
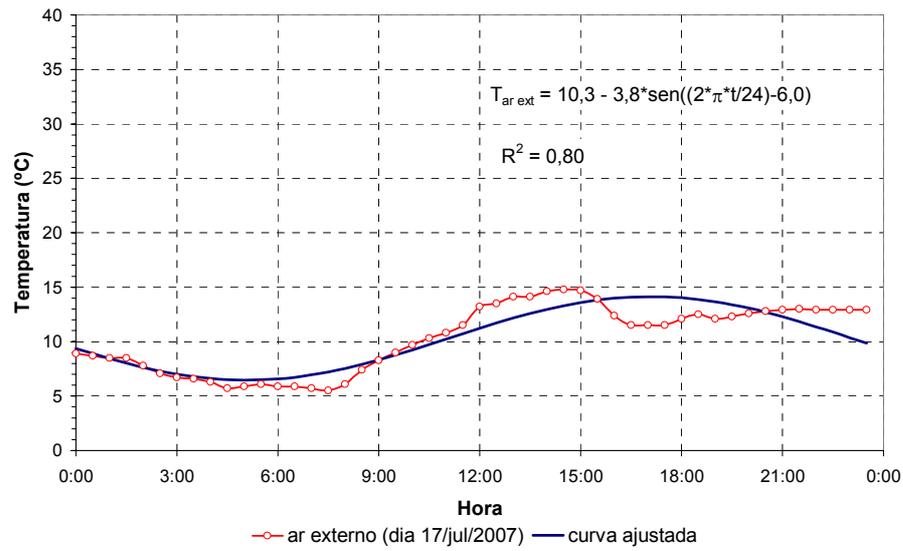


Figura 45 (continua)

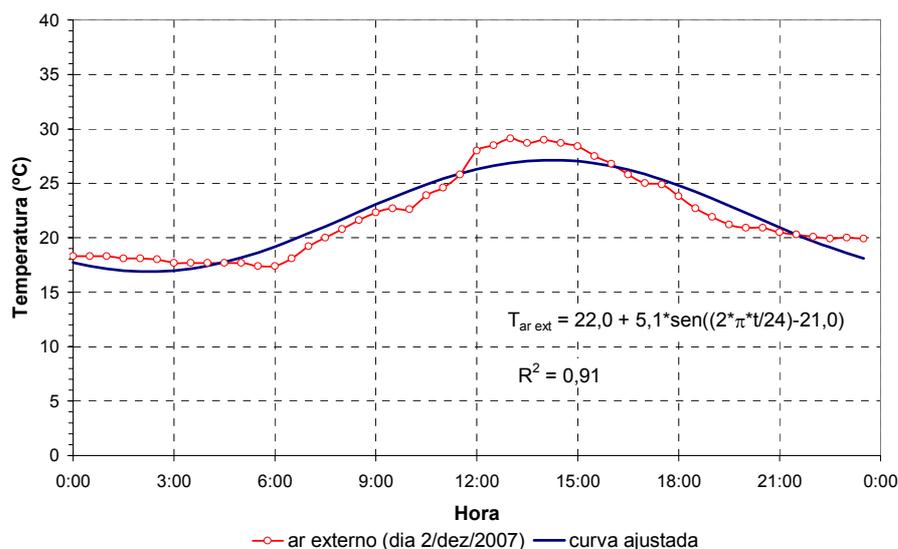


Figura 45: Variação horária da temperatura do ar ambiente de Viamão

5.6.2 Temperaturas do ar no ventilador

Foram monitoradas na pesquisa, como antes referido, as temperaturas do ar aspirado e insuflado pelo ventilador. Os sensores foram o ST-110/19 e o ST-111/21, respectivamente. O ar aspirado pelo ventilador foi captado de uma área sombreada por um bambuzal, admitida como uma área diferenciada, em relação a eventos extremos de temperatura do ar ambiente, em área aberta. A figura 46 compara os valores monitorados para o ar externo desta área (sensor ST-110/19), com os valores de temperatura apresentados no item anterior, obtidos para o ar externo, em área aberta (sensor ST-104/7).

Observa-se, na figura 46, que, de forma geral, independente do período, para os dias mais quentes, as temperaturas do ar no bambuzal apresentaram valores menores, durante o dia, e valores maiores, durante a noite, quando comparados com valores de temperaturas do ar fora desta zona. Já, para os dias com temperaturas menores, os valores de temperaturas do ar, na área do bambuzal, praticamente foram sempre superiores aos valores de temperatura do ar fora desta área. A diferença entre estas temperaturas não foi superior a 2K.

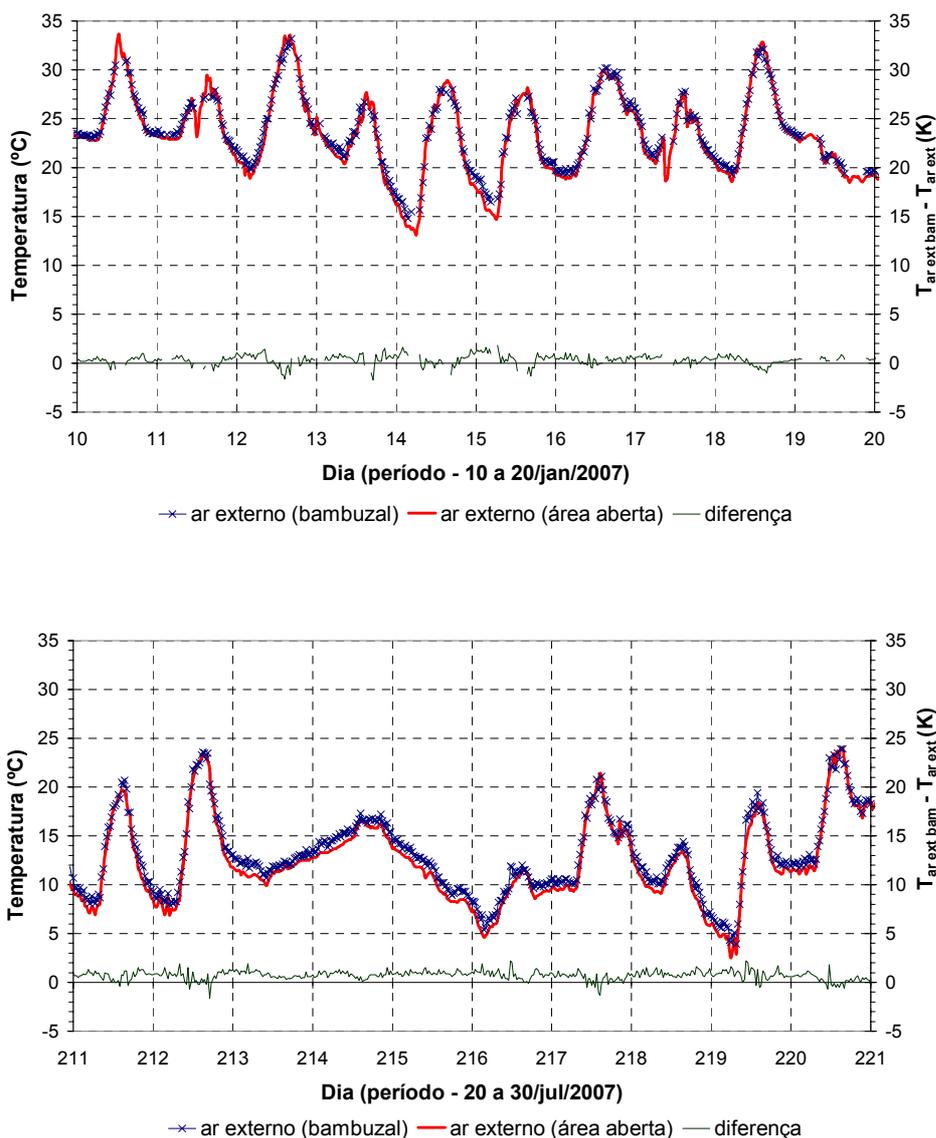


Figura 46: Variação da temperatura do ar na área do bambuzal

A figura 47 mostra as variações de temperatura do ar no ventilador. São valores médios diários, aos quais foram ajustadas curvas senoidais. Estas curvas e suas respectivas equações, também são apresentadas na figura 47. A média e a amplitude da temperatura do ar, na sucção, foram 19,6 °C e 6,9K, respectivamente. Na insuflação estes valores foram 23,0 °C e 6,9K, respectivamente. O ar aspirado aqueceu ao passar pelo ventilador, antes de ser insuflado nos dutos enterrados. No período de verão, este aquecimento atingiu o pico de 4,5K e, no período de inverno, 2,4K.

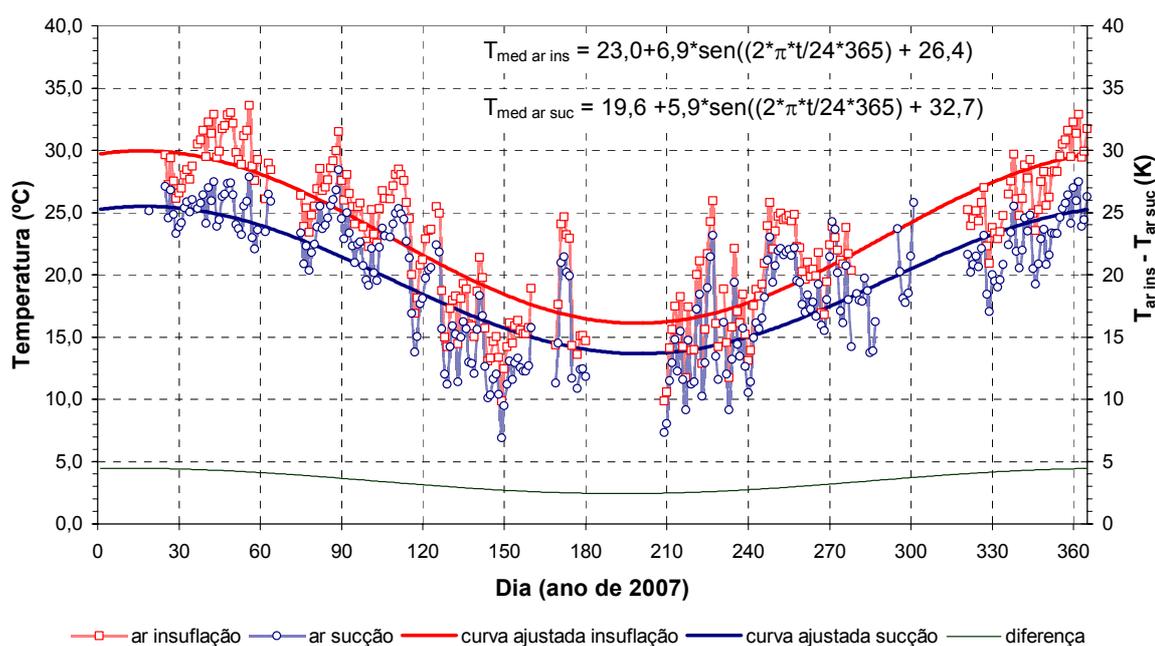


Figura 47: Temperaturas do ar no ventilador

5.6.3 Temperaturas do solo

A figura 48 mostra as variações de temperatura do solo, no local da pesquisa. São seis gráficos correspondentes, cada um, a uma profundidade monitorada na pesquisa: 0,05 m; 0,30 m; 0,50 m; 1,0 m; 2,0 m e 3,0 m. As variações de temperatura no solo são comparadas com a variação de temperatura do ar externo, monitorada em área aberta, visto a proposta do estudo de fazer este ar circular por dutos enterrados, para trocar calor com o solo. Os valores apresentados são valores diários médios da temperatura do solo, obtidos dos dados registrados pelos sensores ST-206/13, ST-206/14, ST-207/15, ST-207/16, ST-208/17 e ST-208/18, respectivamente. Para a temperatura do ar ambiente externo foi utilizado o sensor ST-104/7.

A comparação mostra o solo, com potencial maior para o aquecimento, do que para resfriamento do ar externo. A figura 49 apresenta as diferenças entre os valores médios diários destas temperaturas (diferenças entre as curvas da figura 48 $\rightarrow T_{\text{solo}} - T_{\text{ar ext}}$).

A variação de temperatura registrada para a profundidade de 0,05 m, admitida na pesquisa como a variação de temperatura na superfície do solo, mostrou-se muito próxima à variação de temperatura do ar externo. Para os meses de fevereiro a julho, as curvas ajustadas aos valores médios diários praticamente coincidem; nos demais meses, as curvas mostram a

variação de temperatura do ar externo levemente superior à temperatura do solo, com diferença máxima de 0,7K, na segunda metade do mês de dezembro.

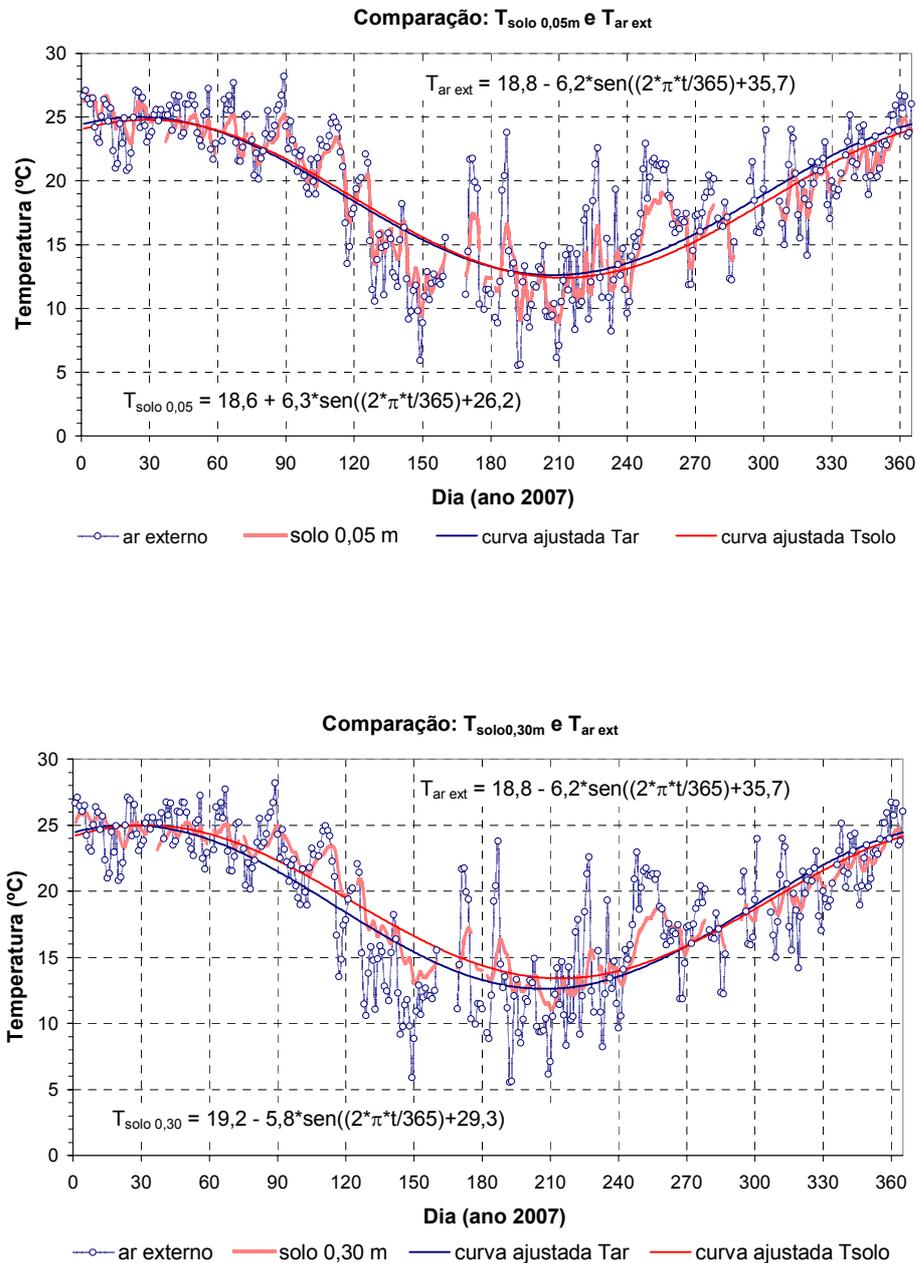


Figura 48 (continua)

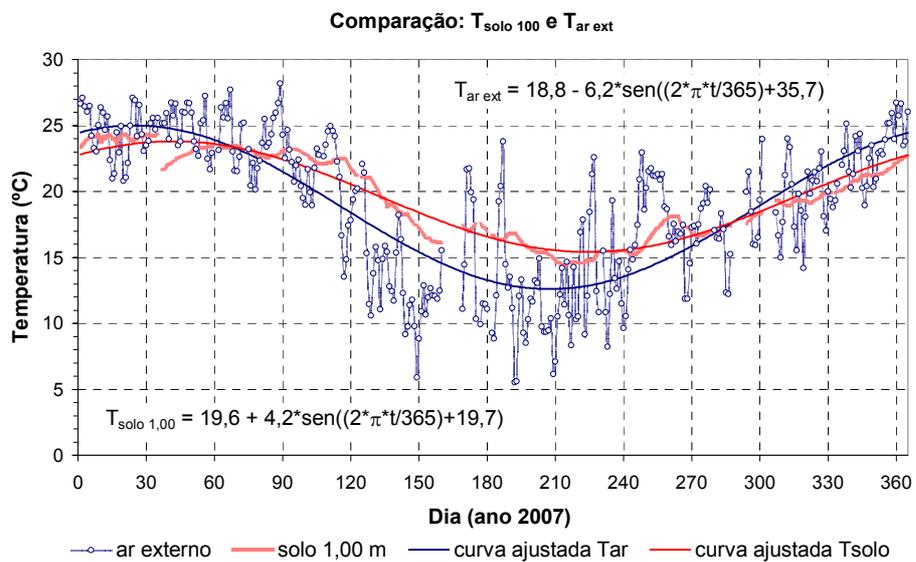
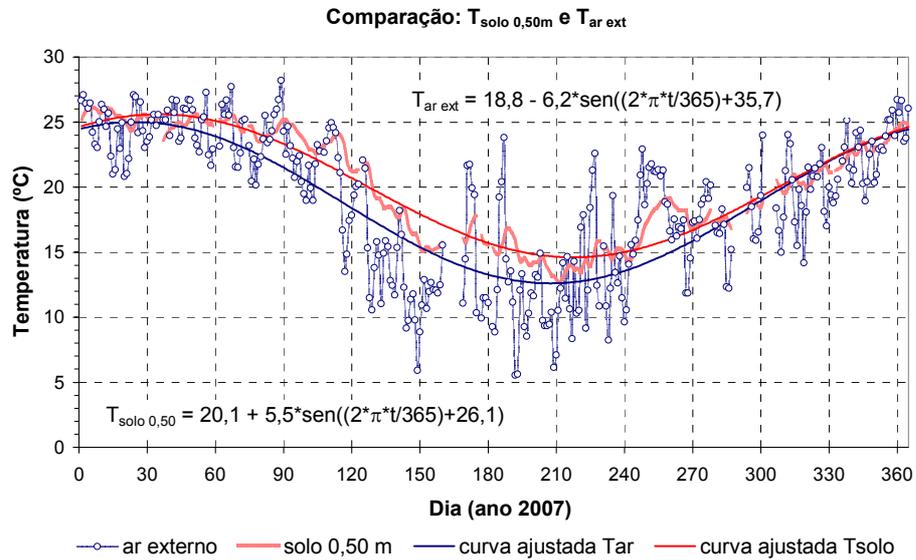


Figura 48 (continua)

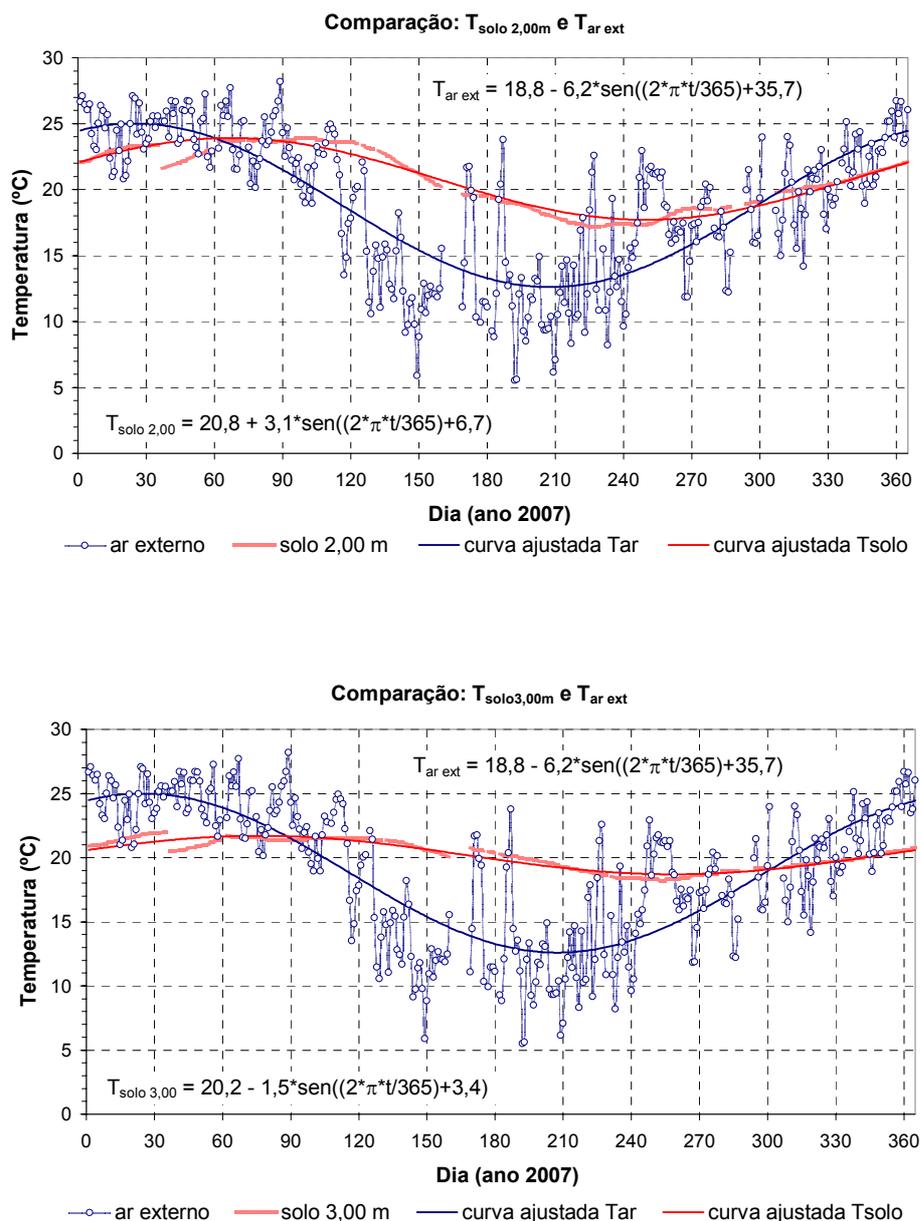


Figura 48: Temperatura média diária, no solo de Viamão, com a profundidade

A diferença entre as curvas aumentou com a profundidade. De forma geral, a temperatura do solo esteve acima da temperatura do ar externo, entre os meses de março a outubro de 2007. As máximas diferenças ocorreram entre o final de junho e metade de julho, atingindo os valores de 2,5K; 3,3K; 6,4K e 6,8K, para as profundidades de 0,5 m; 1,0 m; 2,0 m; e 3,0 m, respectivamente.

Nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro de 2007, basicamente ocorreu o contrário: a temperatura do solo esteve abaixo da temperatura do ar externo. As máximas diferenças

(negativas) ocorreram entre o final de dezembro e a metade de janeiro, atingindo os valores de -1,7K; -2,4K; -4,0K; para as profundidades de 1,0 m; 2,0 m; e 3,0 m, respectivamente. Para a profundidade de 0,5 m, neste período, o solo se manteve praticamente com a mesma temperatura do ar externo.

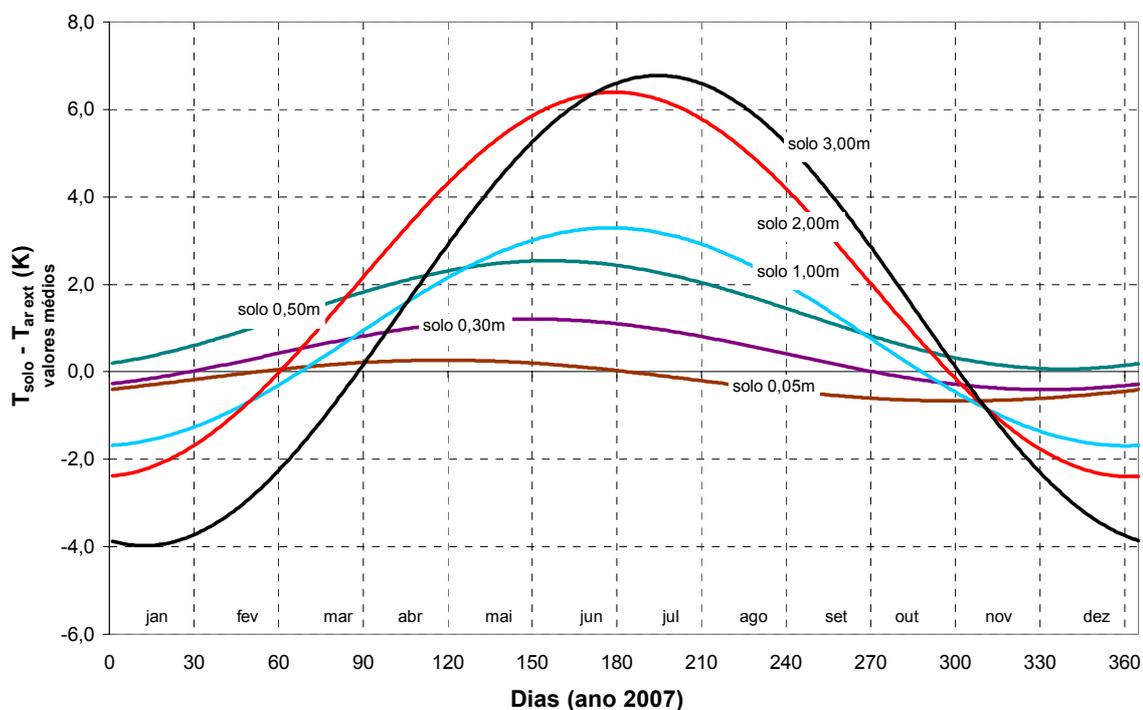


Figura 49: Diferença entre as temperaturas médias diárias no solo e do ar externo

As curvas que representam as diferenças entre as variações de temperatura no solo e as variações de temperatura do ar externo foram amortecidas e defasaram no tempo, com a profundidade, como se observa na figura anterior e se registra na tabela 11.

Tabela 11: Amplitude e defasagem no tempo das variações $T_{\text{solo}} - T_{\text{ar ext}}$

Profundidade (m)	Amplitude total da variação de temperatura $T_{\text{solo}} - T_{\text{ar ext}}$ (K)	Defasagem no tempo (dia)
0,05	1,0	0 (referência)
0,30	1,4	31,5
0,50	2,4	38,0
1,00	5,0	59,5
2,00	8,8	60,5
3,00	12,8	76,5

A amplitude total da diferença variou linearmente com a profundidade, enquanto a defasagem no tempo apresentou uma variação seno-exponencial com a profundidade. Estas variações, obtidas dos dados registrados para profundidades de até 3,0 m, são apresentadas na figura 50.

A amplitude total da diferença de temperatura entre o solo e o ar externo se ampliou com a profundidade, na razão de 4,1K, por metro de profundidade e a defasagem no tempo mostrou a tendência de convergir para um valor constante, quando admitidas profundidades maiores que as monitoradas na pesquisa.

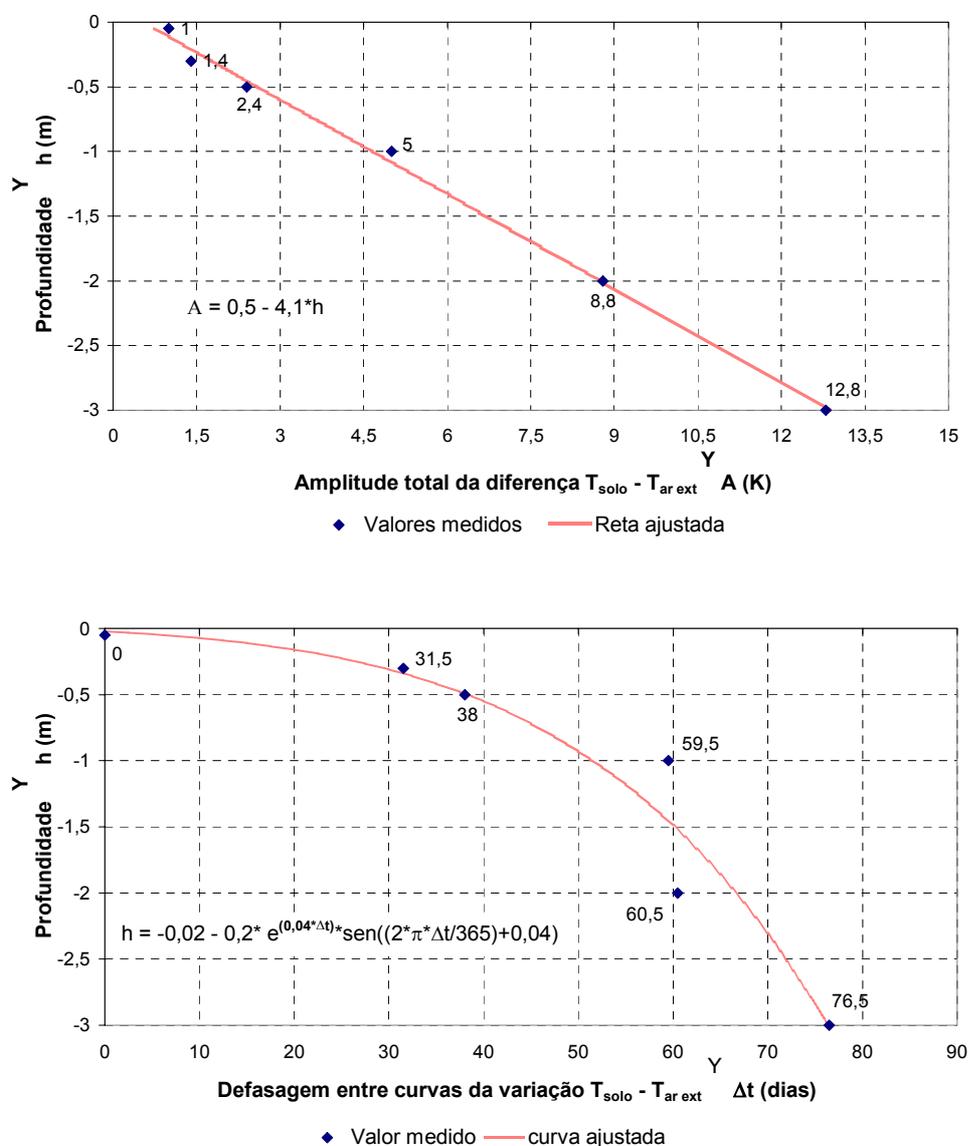


Figura 50: Variação $T_{\text{solo}} - T_{\text{ar ext}} \rightarrow$ amplitude total e defasagem

As variações de temperaturas do solo e do ar externo, durante o dia, em Viamão, são ilustradas pelos gráficos das figuras 51 e 52. São apresentadas as variações de temperatura correspondentes aos dias 5, 10, 15, 20 e 30 do mês de janeiro e do mês de julho. Estes meses foram escolhidos por serem aqueles em que o solo mostrou um maior potencial para resfriamento e aquecimento do ar externo, conforme figura 49. As curvas das figuras comparam as temperaturas do solo, para as profundidades de 0,5 m, 2,0 m e 3,0 m, com a temperatura do ar externo. As duas primeiras profundidades abrangem as posições dos dutos enterrados, na pesquisa, para circulação de ar externo, e 3,0 m é a maior profundidade no solo em que foi monitorada a temperatura.

As curvas mostram a temperatura do ar externo variando bastante, durante o dia e de um dia para outro, enquanto as temperaturas no solo ficaram praticamente constantes. No mês de janeiro, como esperado, para as profundidades monitoradas, o solo se esfriou com a profundidade e no mês de julho ocorreu o contrário, o solo se esquentou com a profundidade.

As figuras 51 e 52 ilustram o que ocorreu no conjunto dos dias do ano de 2007. Dependendo da profundidade analisada, como não poderia deixar de ser, em alguns dias a temperatura do ar externo se manteve abaixo ou acima das temperaturas do solo; entretanto, com frequência, em dias mais quentes, a temperatura do ar externo foi maior que as temperaturas do solo, durante o dia, e menor à noite, mas nem sempre. Em outros dias, mais frios, a temperatura do ar externo foi menor que a temperatura solo, dia e noite, mas também nem sempre.

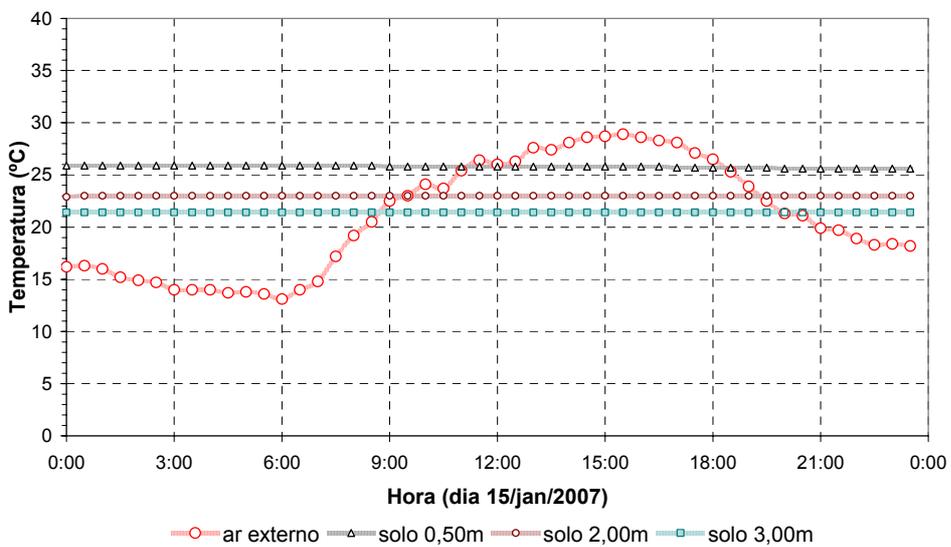
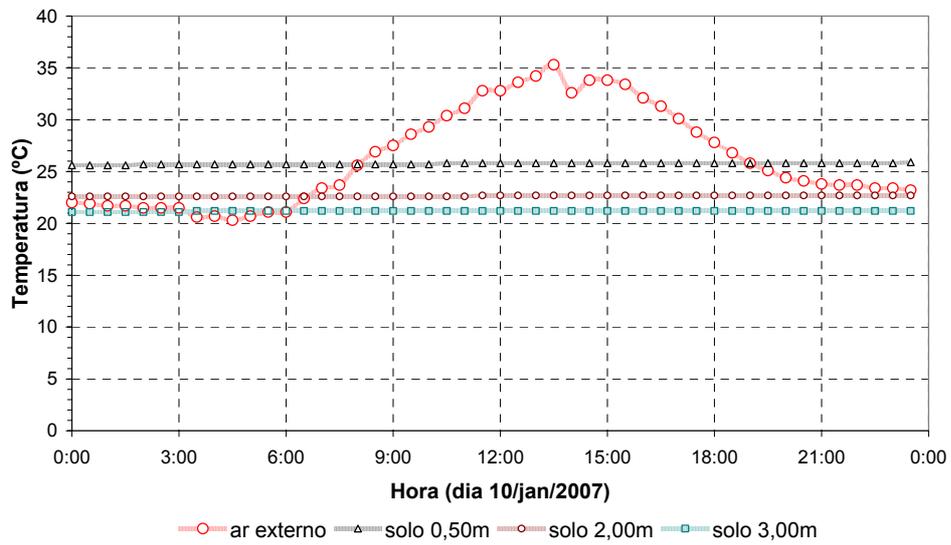
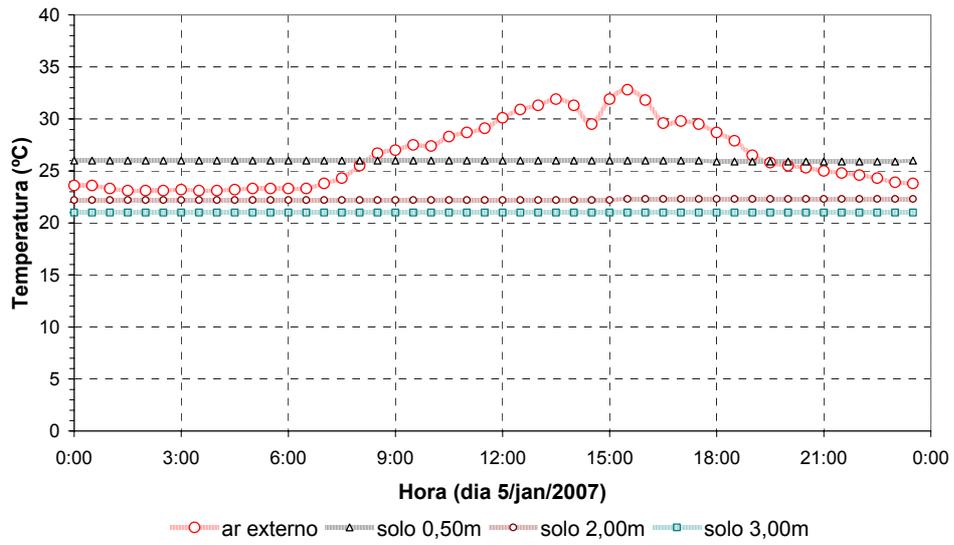


Figura 51 (continua)

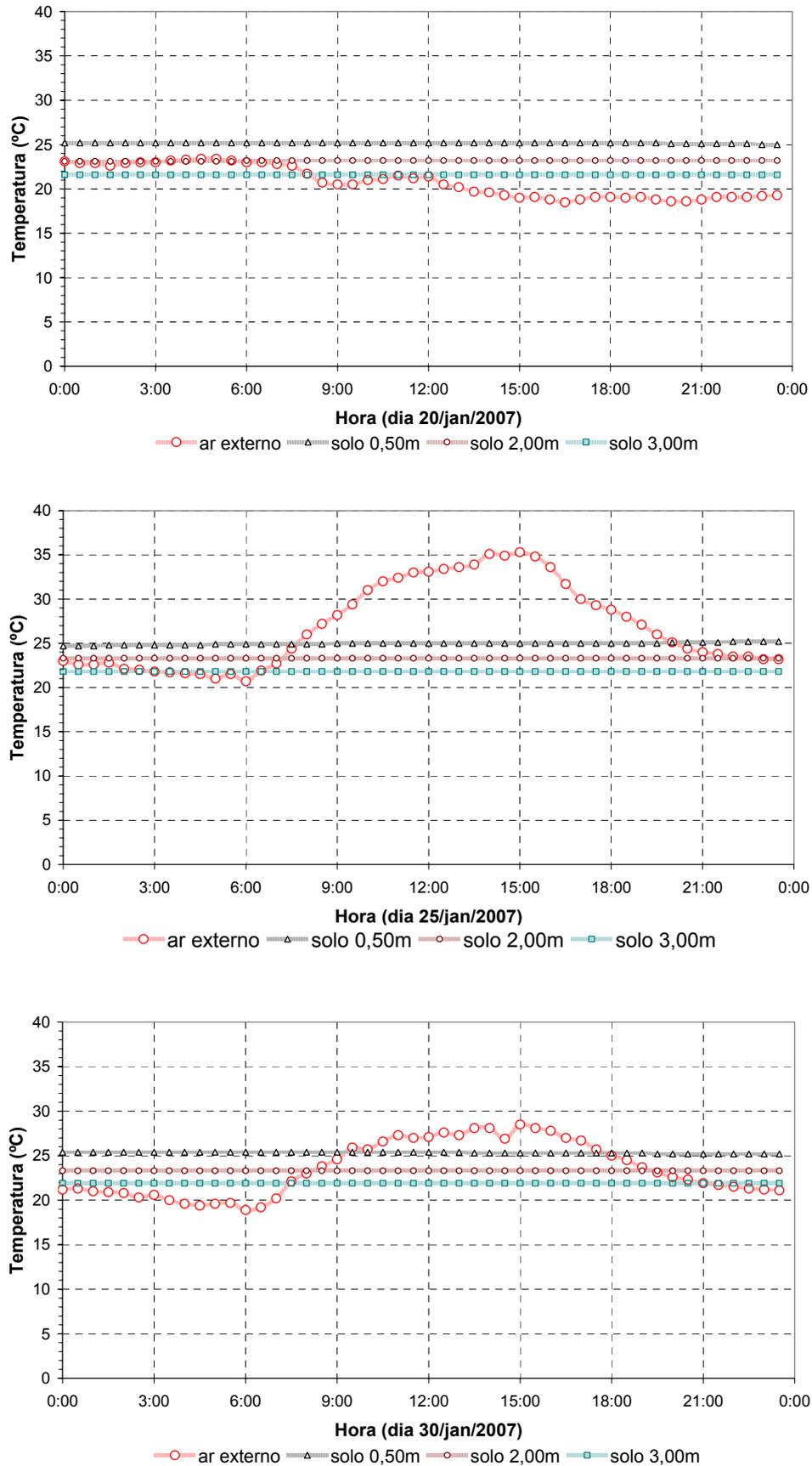


Figura 51: Temperaturas no solo e do ar externo de Viamão – dias de janeiro

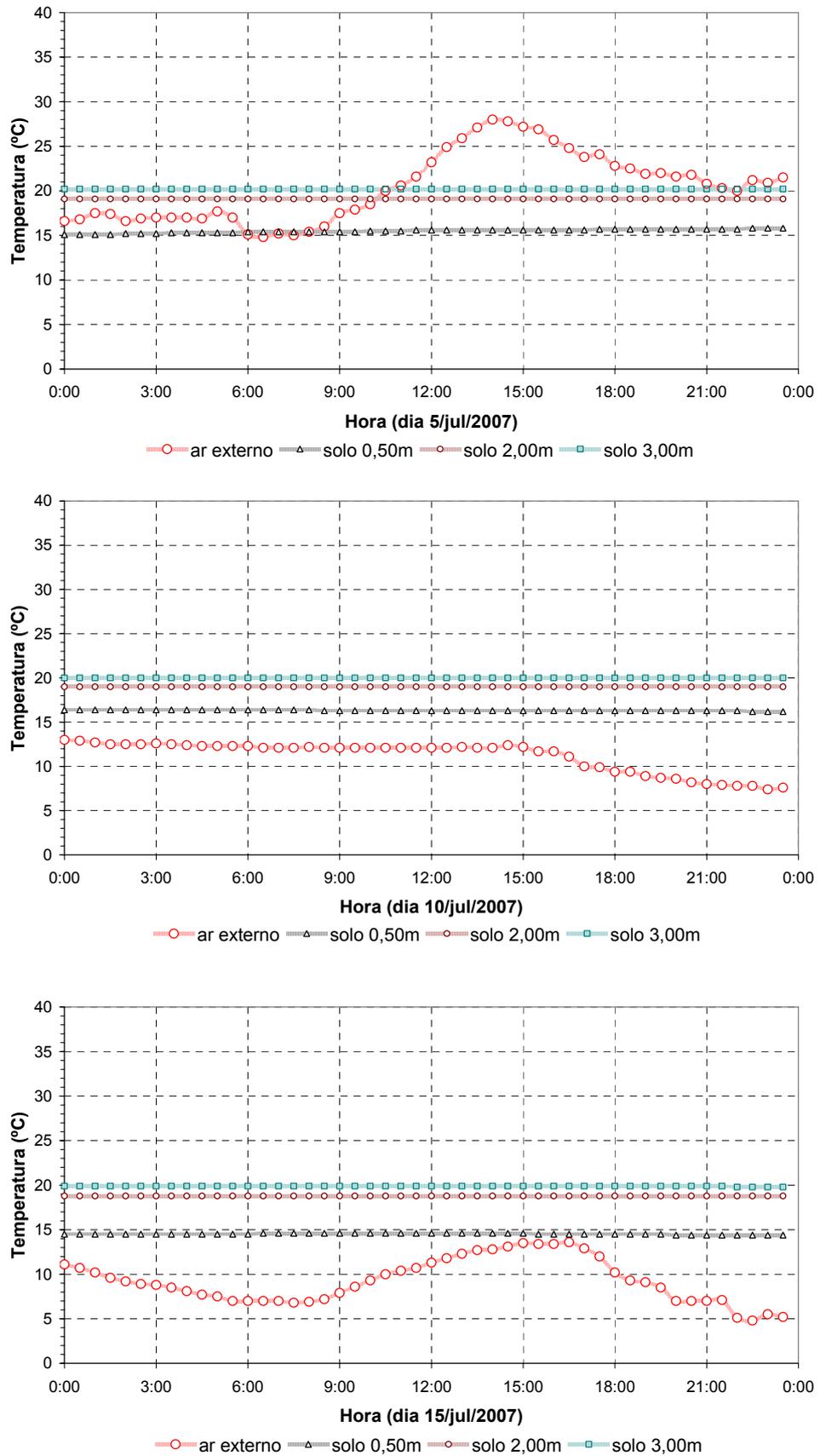


Figura 52 (continua)

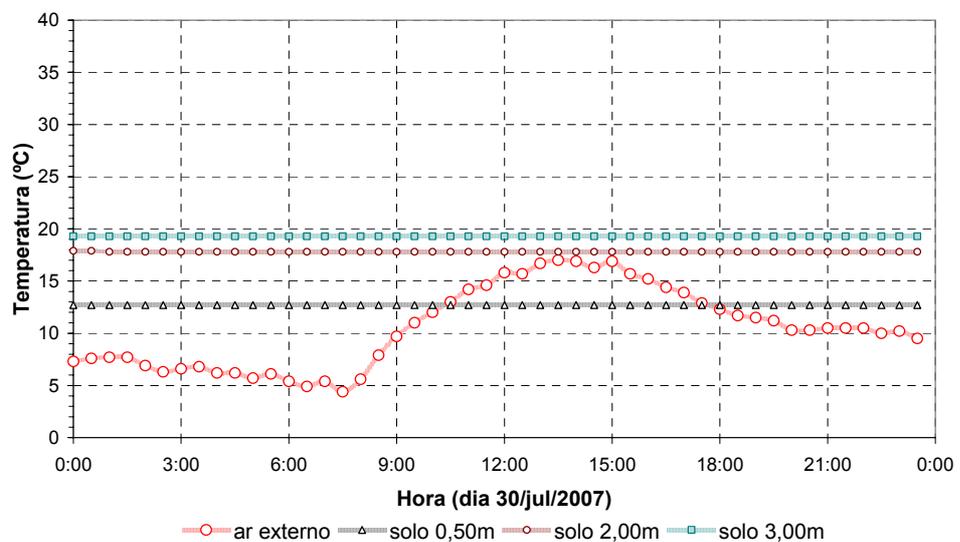
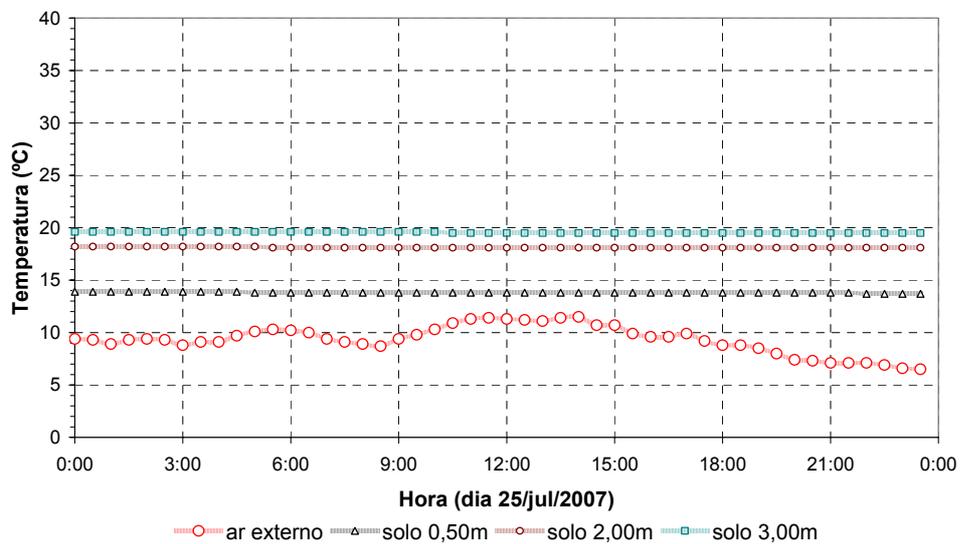
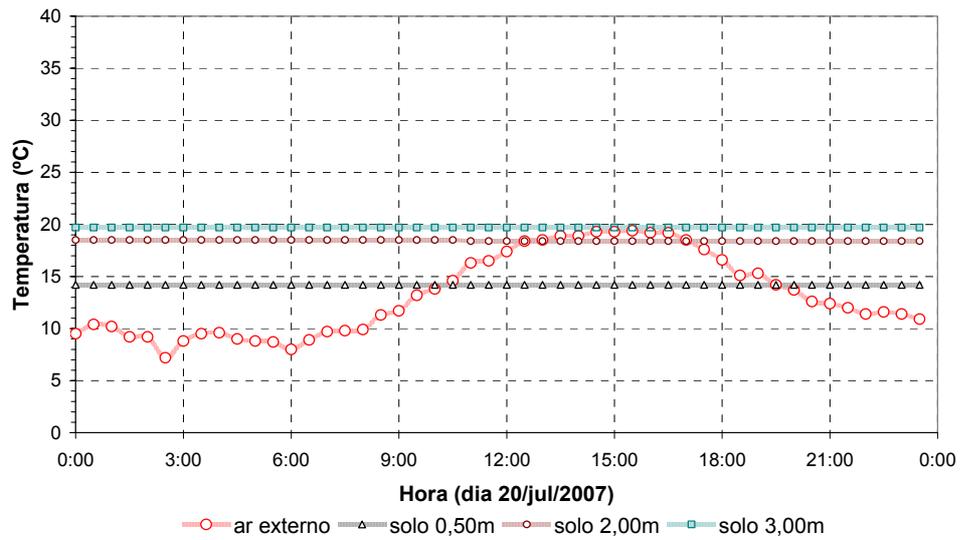


Figura 52: Temperaturas no solo e do ar externo de Viamão – dias de julho

As diferenças de temperatura entre o solo e o ar externo (diferenças médias diárias), apresentadas na figura 49, são conformes com este comportamento térmico, apresentado nas figuras 51 e 52, também do ar externo em relação ao solo, observado ao longo das horas do dia. Pensando os valores médios diários, da figura 49, como indicativo do potencial de operacionalização de um processo de troca térmica entre o ar externo e o solo percebe-se, este processo, funcionando de forma contínua, ou seja, o ar externo trocando calor com o solo vinte e quatro horas por dia, para ser usado como ar de renovação em ambientes construídos.

Como a finalidade de circular o ar externo, por dutos enterrados, é amenizar as condições térmicas de ambientes construídos, este processo operacional poderá ser otimizado, a partir da adoção de um sistema inteligente de gerenciamento de seu funcionamento, o qual permita a troca térmica somente em períodos favoráveis à condição de conforto térmico do ambiente. Por exemplo, em alguns dias quentes, a temperatura do solo, à noite, é superior à temperatura do ar ambiente externo, o que implicaria em usar, na renovação do ar do ambiente construído, neste período, o próprio ar externo, sem passá-lo pelo duto enterrado no solo. Outro exemplo, em alguns dias frios, a temperatura do solo, durante o dia, é inferior à temperatura do ar ambiente externo, o que também implicaria em não aproveitar, neste período, o ar externo vindo dos dutos enterrados.

Buscando estimar o potencial operacional referido no parágrafo acima, os dados relativos às temperaturas no solo e do ar ambiente externo foram reorganizados, de forma a permitir a avaliação, a cada registro (meia hora), da correspondente diferença térmica entre ambos. Para cada dia do ano de 2007, foram separadas as diferenças positivas, das negativas, tendo por referência a temperatura do solo. Admitindo toda a energia transformada em variação de temperatura, os valores positivos, então, foram associados a um diferencial térmico, com potencial operacional de aquecimento do ar externo, e os valores negativos, a um diferencial térmico com potencial operacional de resfriamento do ar externo. Estas diferenças, tanto as positivas, como as negativas, se mostraram com grande dispersão e, para viabilizar as análises, admitiram-se **valores médios no mês**, determinados conforme os procedimentos e expressões a seguir, para cada profundidade analisada, do solo:

a) cálculo das diferenças de temperatura;

$$\Delta T_{\text{solo h x ar ext}}^j = T_{\text{solo h}}^j - T_{\text{ar ext}}^j \quad (5.6)$$

b) 1ª análise - $\Delta T_{\text{solo } h \times \text{ar ext}}^j > 0 \rightarrow$ potencial do solo para aquecimento do ar externo;

$$\Delta T_{\text{solo } h \times \text{ar ext}}^j \leq 0 \rightarrow \Delta T_{\text{solo } h \times \text{ar ext}}^j = 0$$

$$(T_{\text{solo } h} - T_{\text{ar ext}})_{\text{média mensal}} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta T_{\text{solo } h \times \text{ar ext}}^j}{n} > 0 \quad (5.7)$$

c) 2ª análise - $\Delta T_{\text{solo } h \times \text{ar ext}}^j < 0 \rightarrow$ potencial do solo para resfriamento do ar externo;

$$\Delta T_{\text{solo } h \times \text{ar ext}}^j \geq 0 \rightarrow \Delta T_{\text{solo } h \times \text{ar ext}}^j = 0$$

$$(T_{\text{solo } h} - T_{\text{ar ext}})_{\text{média mensal}} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta T_{\text{solo } h \times \text{ar ext}}^j}{n} < 0 \quad (5.8)$$

Nas equações (5.6), (5.7) e (5.8): h , é a profundidade do solo analisada; j , o número do registro de temperatura analisado; n , o número de registros de temperaturas, no mês.

O valor médio mensal das diferenças positivas de temperaturas, correspondente a equação (5.7), mostrou o potencial térmico do solo, para operacionalização de um sistema de dutos enterrados, visando aquecer o ar externo. Já, o valor médio mensal das diferenças negativas de temperatura, correspondente a equação (5.8), mostrou este potencial do solo para resfriar este ar. A figura 53 apresenta estes valores, para cada mês do ano, e para as profundidades de 0,5 m, 1,0 m, 2,0 m e 3,0 m.

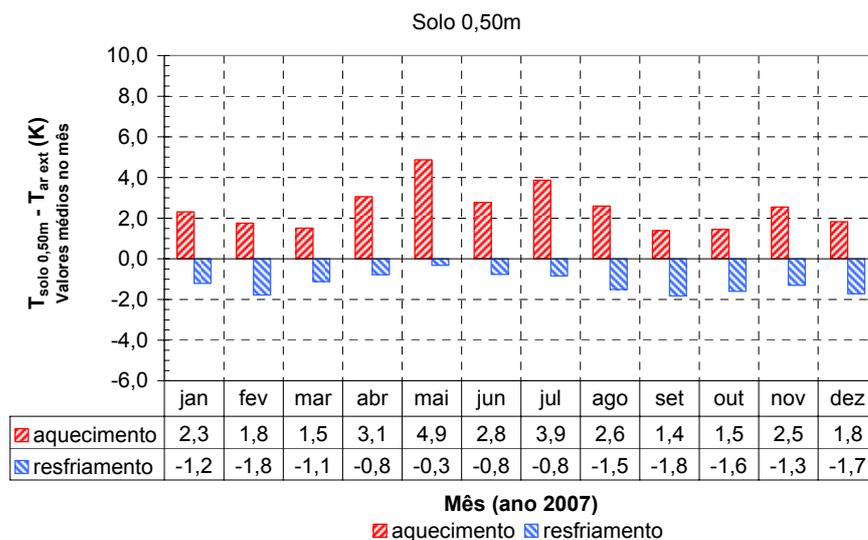


Figura 53 (continua)

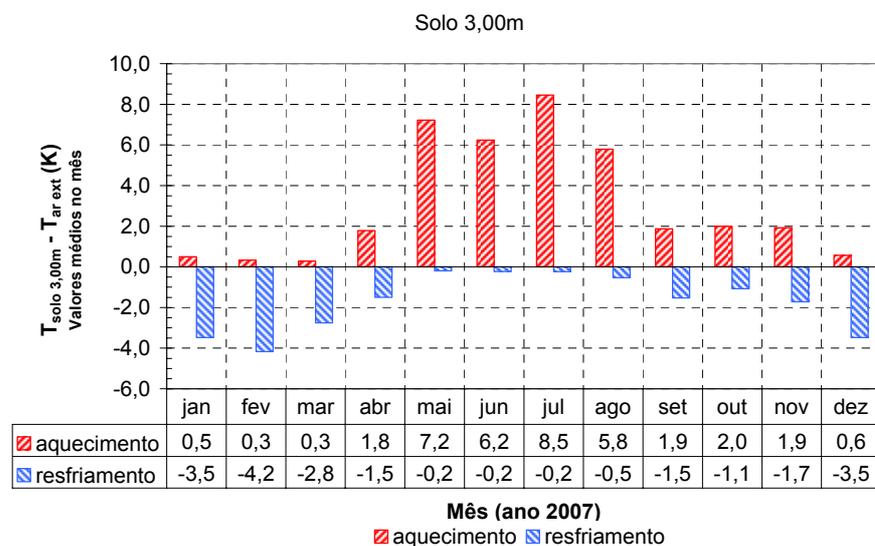
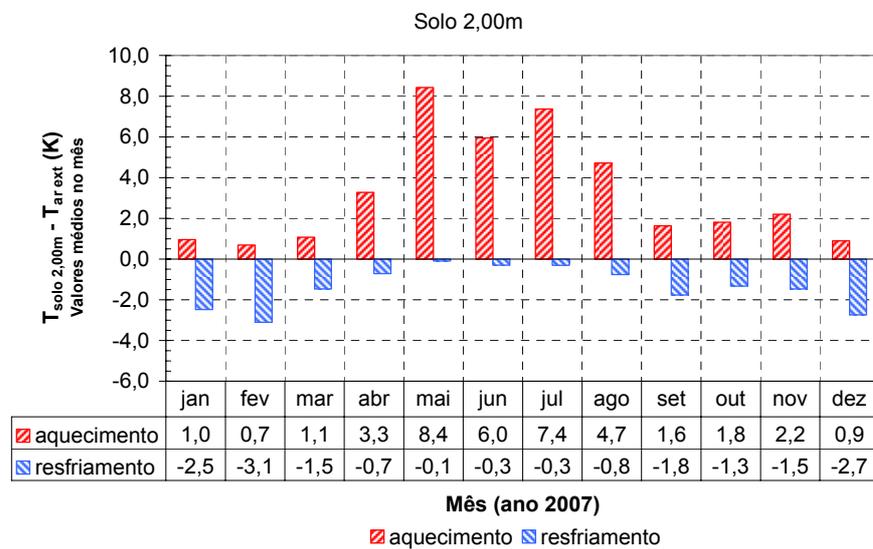
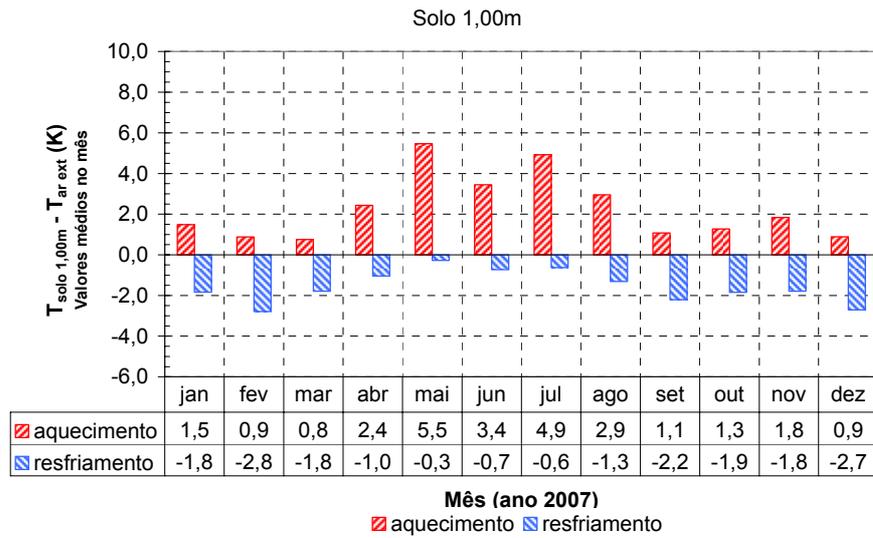


Figura 53: Médias, no mês, da diferença entre as temperaturas no solo e do ar externo

Como referido anteriormente, o potencial do solo, para aquecer, foi maior do que para resfriar o ar externo circulante em dutos enterrados. De forma geral, o potencial de operacionalização, para um eventual sistema de aquecimento, foi maior nos meses de maio, junho, julho e agosto e o de resfriamento, nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro. O mês de maio de 2007 foi um mês de temperaturas baixas para o período, o que gerou um potencial maior para a troca de calor entre o solo e o ar externo, para todas as profundidades analisadas.

Pelos dados monitorados no ano de 2007, para pequenas profundidades (menos de 1 m), o potencial operacional para um sistema de aquecimento do ar circulante em dutos enterrados foi baixo, menos de 2K, para 0,5 m de profundidade. Pouco mais que 2K, para a profundidade de 1m. Para profundidades de 2 m ou mais, este potencial pode ser superior a 8K. Para resfriamento, este potencial pode chegar a 4K.

A proposta de analisar as diferenças de temperatura, entre o solo e ar externo, no experimento, usando valores médios diários constantes, ao longo de cada mês do ano de 2007, facilitou estimar, para cada um destes dias típicos mensais, o número de horas diárias em que o solo apresentou temperatura superior à temperatura do ar externo (diferenças positivas) e, também, o número de horas diárias em que a temperatura do ar externo foi superior à temperatura do solo (diferenças negativas). A partir da proporção entre as diferenças positivas e negativas, apresentadas na figura 53, chegou-se aos números de horas referidos acima, que estão resumidos na representação em barras, da figura 54, para as profundidades analisadas.

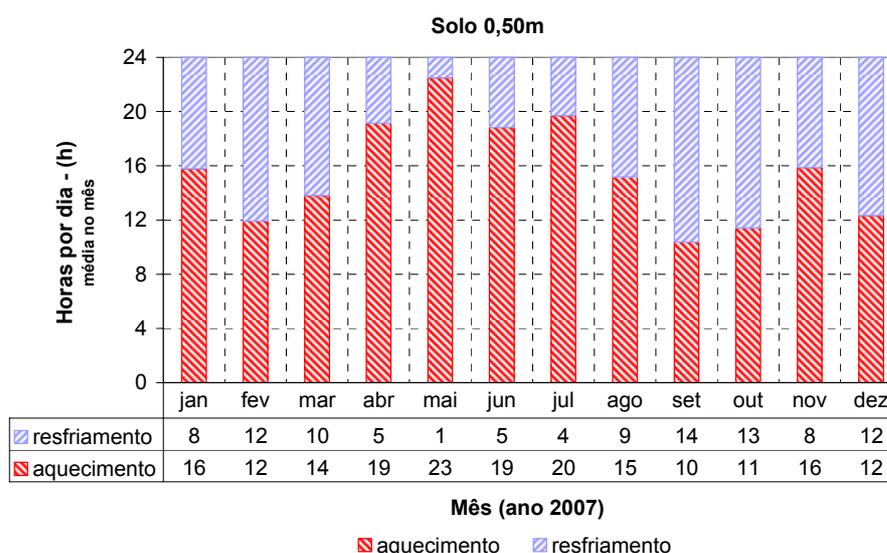
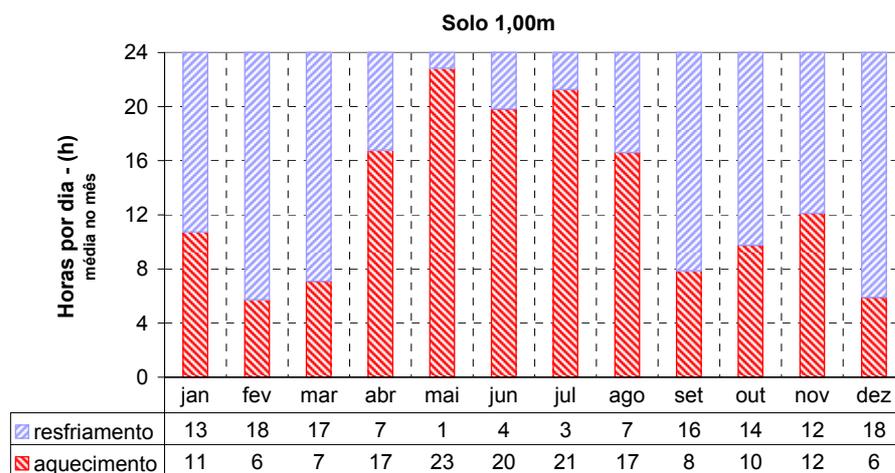
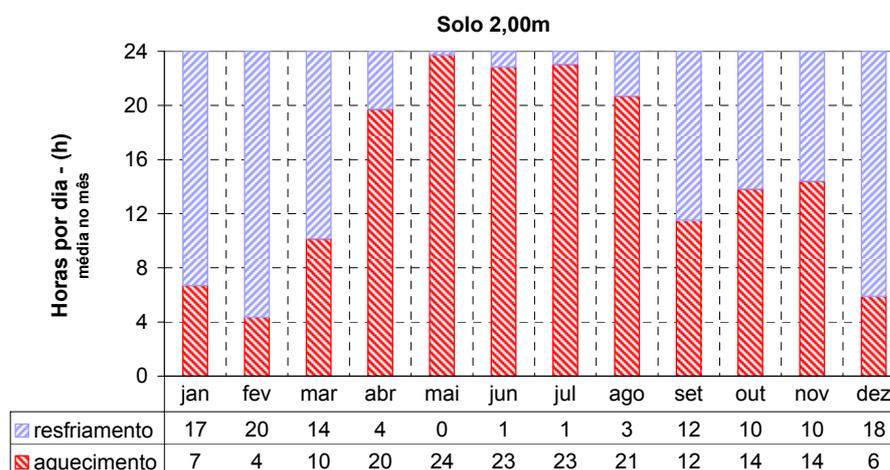


Figura 54 (continua)



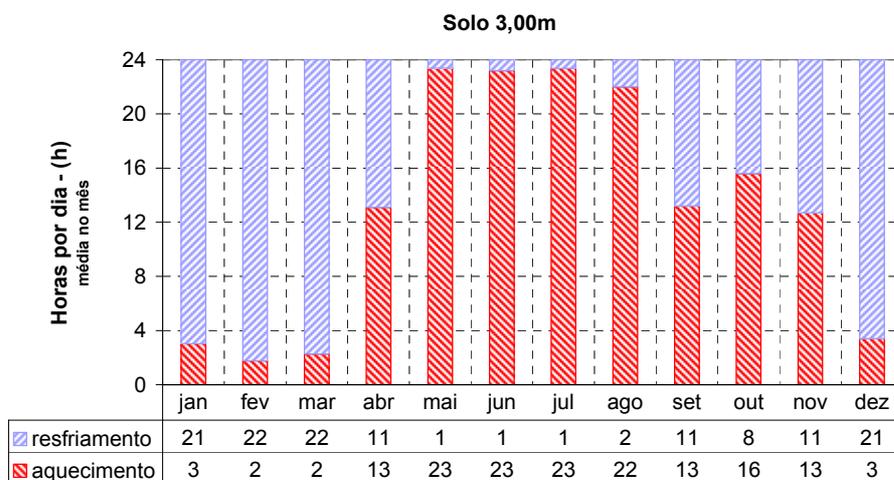
Mês (ano 2007)

▨ aquecimento ▨ resfriamento



Mês (ano 2007)

▨ aquecimento ▨ resfriamento



Mês (ano 2007)

▨ aquecimento ▨ resfriamento

Figura 54: Horas do dia, com $T_{\text{solo}} - T_{\text{ar ext}}$ positivo ou negativo

Os valores médios diários, apresentados acima, são úteis à definição do potencial de operacionalização do solo, de forma a aquecer ou resfriar o ar externo. Nos meses em que o solo apresentou maior potencial de aquecimento do ar externo, que foram maio, junho, julho e agosto, a temperatura do ar externo se manteve abaixo da temperatura do solo, entre 19 e 23 horas, por dia, dependendo da profundidade. Por outro lado, nos meses em que o solo apresentou maior potencial para resfriamento do ar externo, que foram janeiro, fevereiro e dezembro, a temperatura do ar externo se manteve acima da temperatura do solo, entre 17 e 22 horas, por dia, dependendo da profundidade, exceto para a profundidade de 0,5 m, onde este tempo não passou de 12 horas, por dia.

5.6.4 Temperaturas do ar nos trocadores de calor solo-ar

Os trocadores de calor solo-ar, neste estudo, como já referido, foram constituídos pelos dutos A, B e C, enterrados no solo na fase de experimento, por onde circulou o ar do ambiente externo, para ser usado como ar de renovação, nos ambientes da Casa Ventura.

As variações de temperatura do ar em escoamento foram registradas por sensores posicionados ao longo dos dutos, como mostra a figura 32: na posição 2 (entrada do ar – $x=0,0$ m), foi o sensor ST-111/21, comum aos três dutos (este sensor, como antes referido, foi instalado no bocal de saída do ventilador, ou seja, no início da tubulação de insuflação do ar nos dutos, antes das derivações para os três dutos); na posição 3 ($x=11,0$ m), foram os sensores ST-101/1, ST-102/3, ST-103/5, para os dutos A, B e C, respectivamente; na posição 4 ($x=34,0$ m), foram os sensores ST-105/23, ST-106/25 e ST-107/27, para os dutos A, B e C, respectivamente; e na posição 5 (saída do ar – $x=42,0$ m), foi o sensor ST-205/33, somente para o duto A.

As figuras 55, 56 e 57 mostram as variações de temperatura do ar, ao passar pelos dutos A, B e C, respectivamente. Os valores apresentados são valores diários médios da temperatura do ar, obtidos dos dados registrados pelos correspondentes sensores, relacionados acima.

Nos trechos iniciais dos trocadores de calor solo-ar, entre a posição de monitoramento na entrada ($x=0,0$ m) e a posição 3 ($x=11,0$ m), a profundidade dos dutos foi gradativamente aumentando, variando desde a superfície do solo até a profundidade máxima em que ficaram enterrados, conforme mostra a figura 33. Nos dutos A e B, esta variação foi de 1,60 m e no duto C, de 0,50 m. Além disso, nestes trechos as ligações entre o ventilador e os bocais dos dutos, na superfície do solo, foram executadas com dutos flexíveis e aéreos. O mesmo

aconteceu nos trechos finais dos trocadores de calor, entre a posição 4 ($x=34,0$ m) de monitoramento e a saída dos dutos. Somente no trecho central, entre as posições de monitoramento 3 e 4, os dutos tiveram profundidade constante: 0,5 m, para o duto C, e 1,60 m, para os dutos A e B.

Para facilitar a visualização das variações de temperatura do ar, ao longo dos dutos, nas figuras a seguir cada gráfico apresenta as variações de temperatura, em duas posições de monitoramento sequentes. O gráfico seguinte repete a última variação do gráfico anterior, como referência.

O aquecimento do ar externo, ao passar pelo ventilador, como referido no item 5.6.2, influenciou nas variações de temperatura deste ar no interior dos dutos. Mesmo assim, as curvas mostram que, nos trechos centrais dos dutos A e B, posicionados na profundidade 1,60 m, as variações de temperatura do ar tiveram a forma esperada. O ar externo foi aquecido, nos meses mais frios, e resfriado, nos meses mais quentes do ano de 2007. Já, no trecho central do duto C, enterrado a 0,50 m de profundidade, o ar externo foi sempre resfriado, como mostra o segundo gráfico da figura 57.

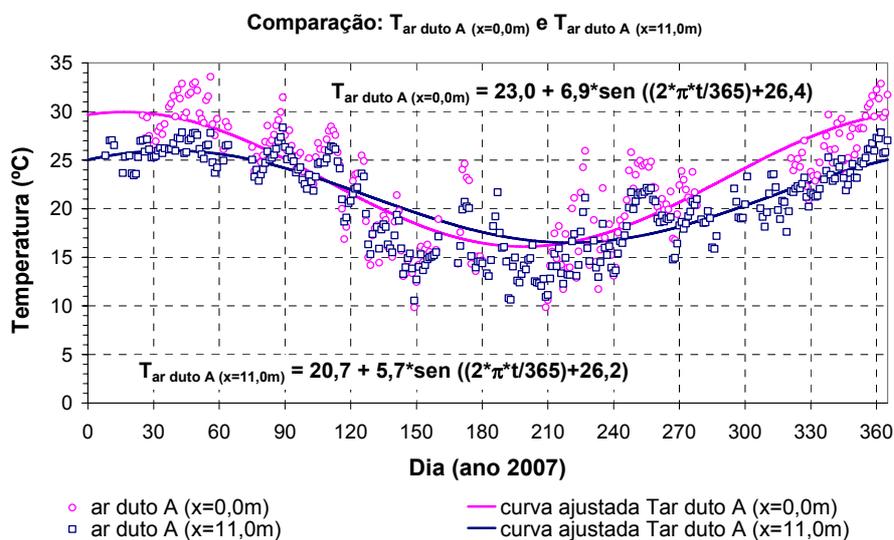


Figura 55 (continua)

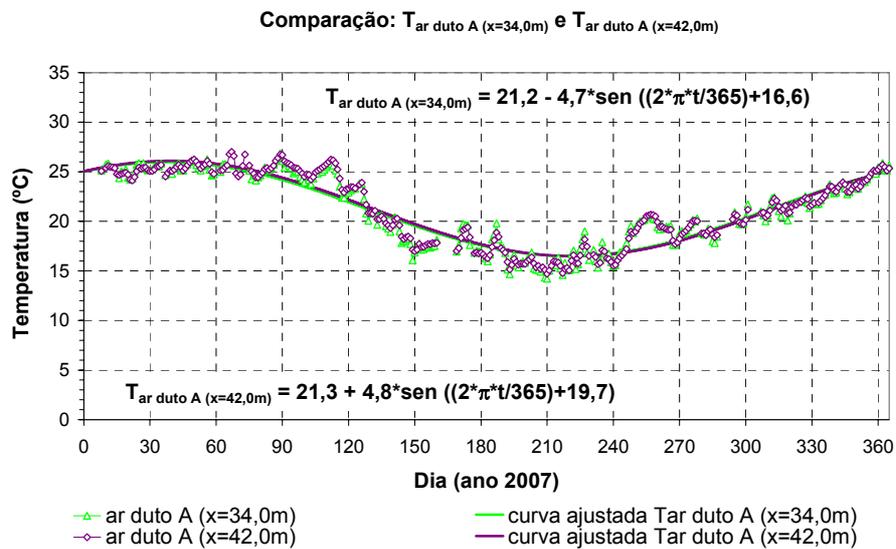
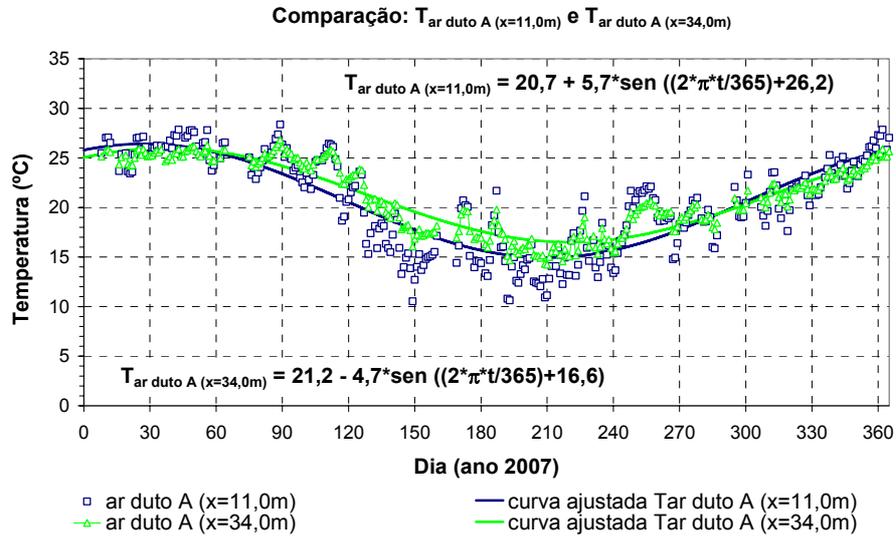


Figura 55: Temperaturas do ar em escoamento no duto A

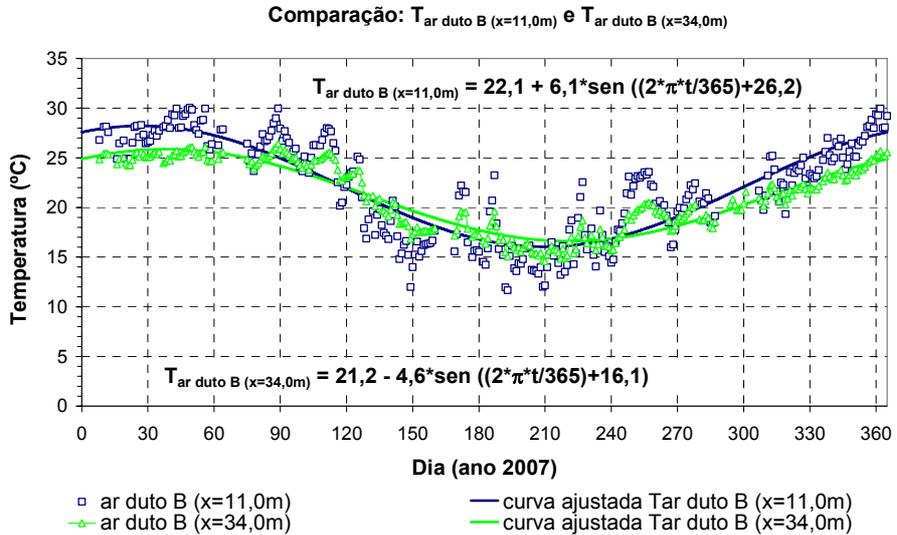
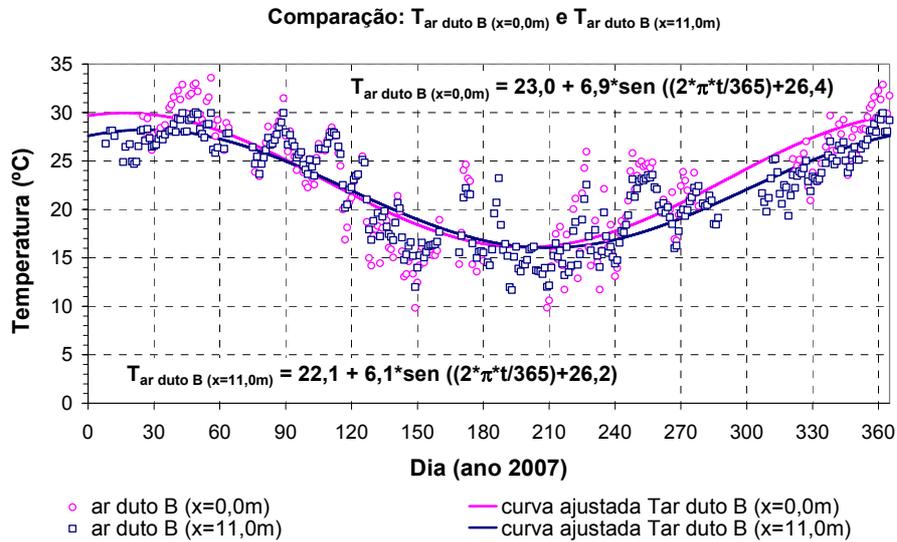


Figura 56: Temperaturas do ar em escoamento no duto B

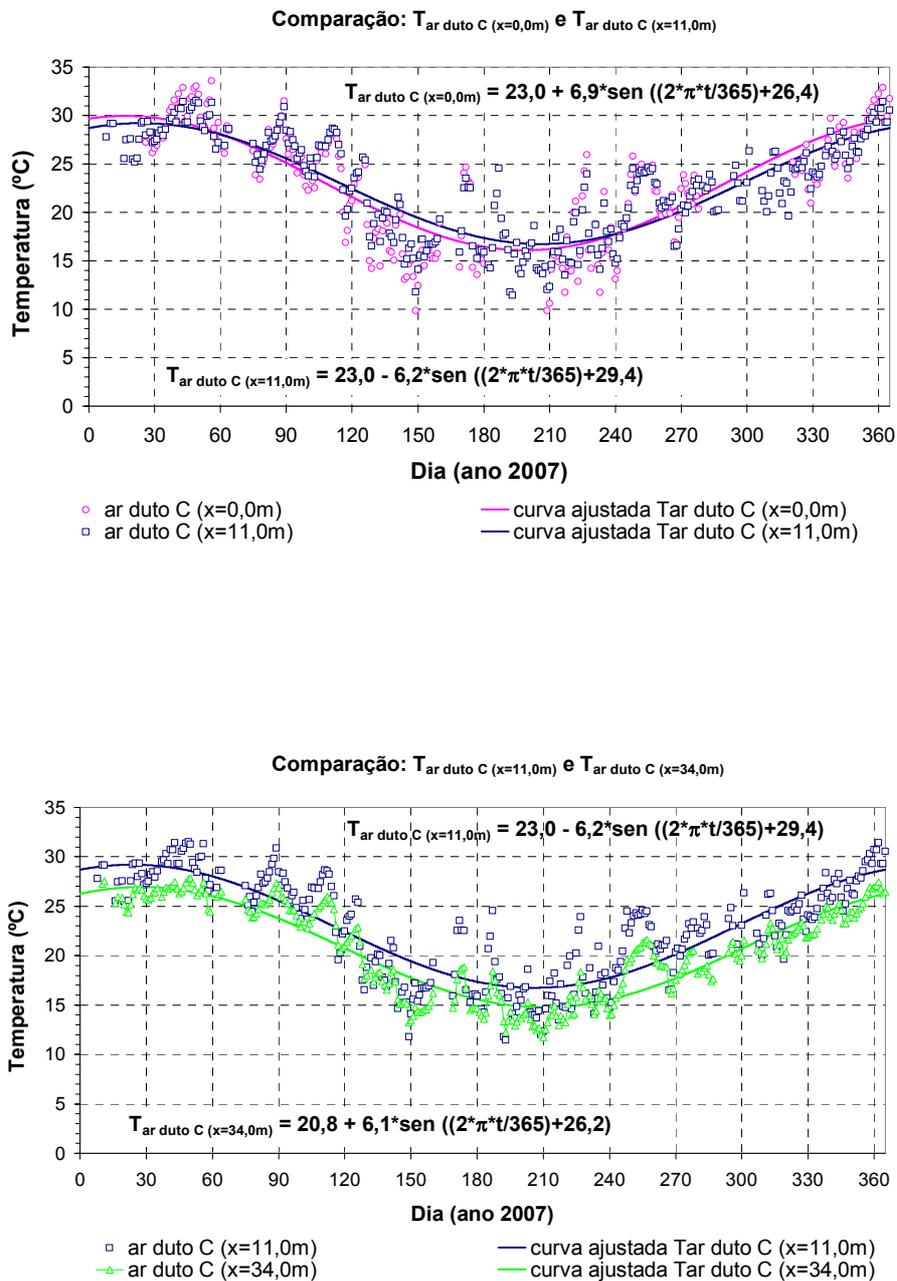


Figura 57: Temperaturas do ar em escoamento no duto C

Continuando a abordagem sobre as variações de temperatura do ar em escoamento nos dutos enterrados, as variações diárias são ilustradas pelos gráficos mostrados nas figuras 58, 59 e 60. São apresentadas, para cada duto monitorado, as temperaturas correspondentes aos 10 dias dos meses de janeiro, abril, julho e outubro. Os gráficos que compõem as figuras comparam

as variações de temperatura do ar, entre as posições extremas dos trechos centrais dos dutos enterrados, ou seja, nos trechos com profundidade constante, entre as posições de monitoramento 3 e 4. As variações de temperaturas do solo, também estão colocadas nos gráficos, para comparações. Para os dutos A e B, enterrados na profundidade¹³ de 1,60m, as comparações foram feitas com dados monitorados para o solo na profundidade de 2,0 m.

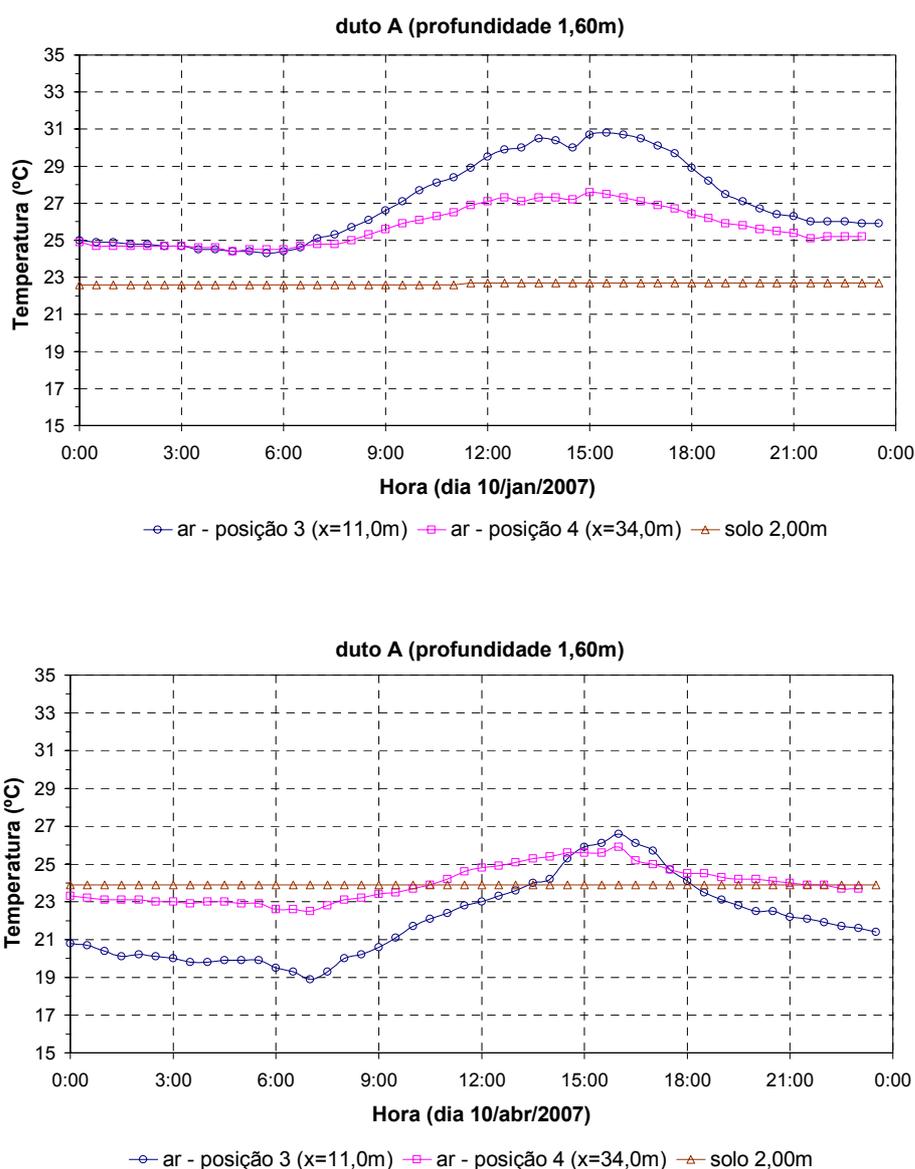


Figura 58 (continua)

¹³ Não foram monitoradas, na pesquisa, temperaturas do solo na profundidade de 1,60m.

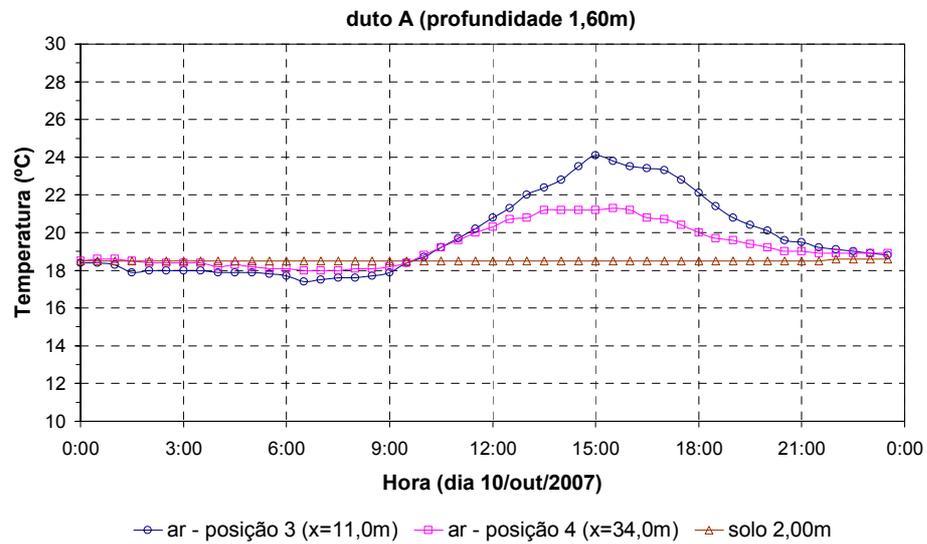
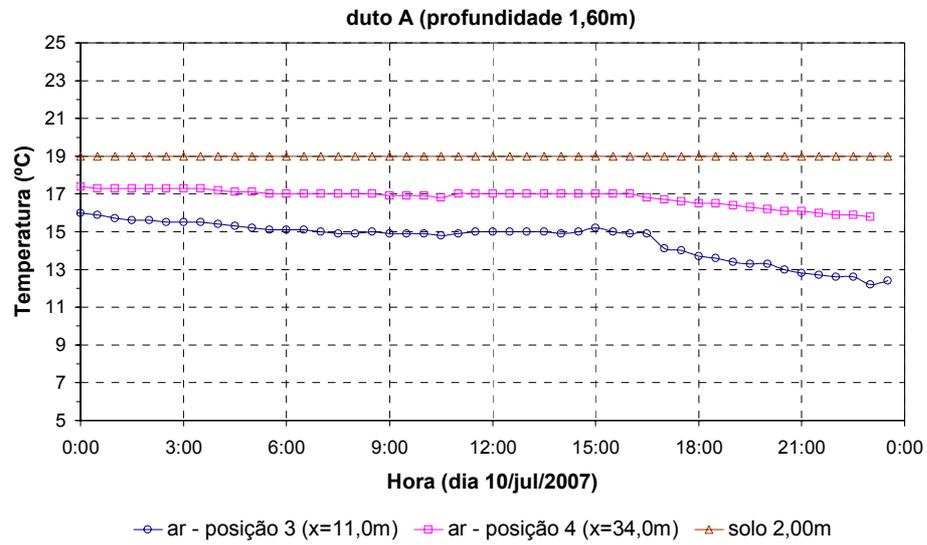


Figura 58: Variação diária da temperatura do ar em escoamento no duto A

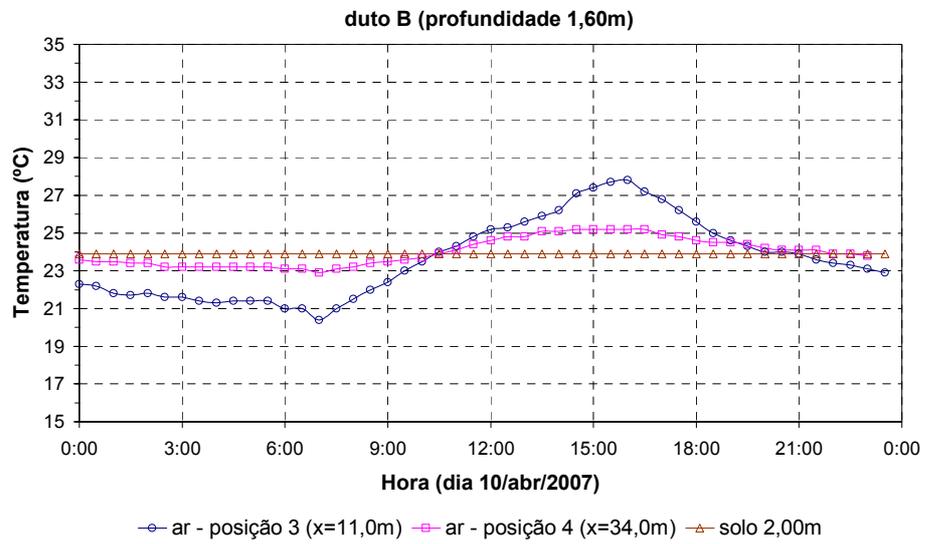
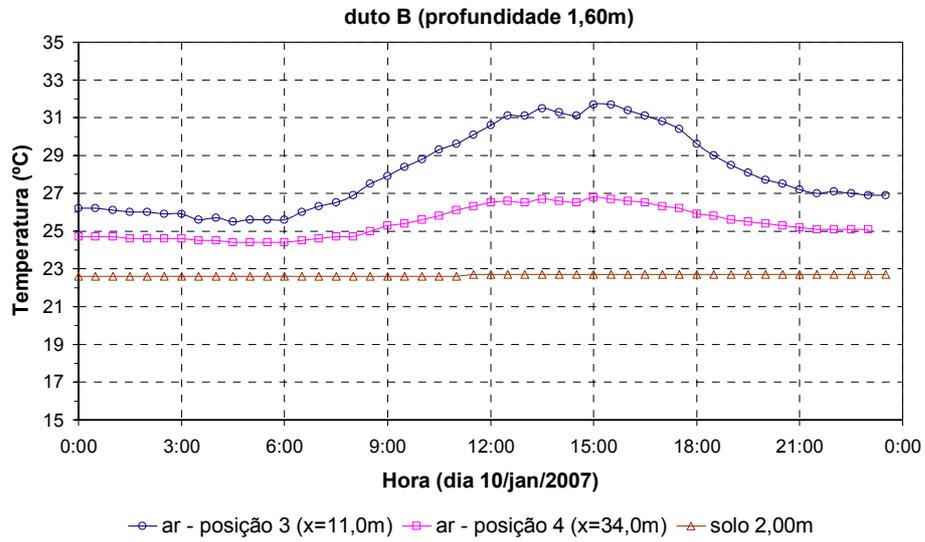


Figura 59 (continua)

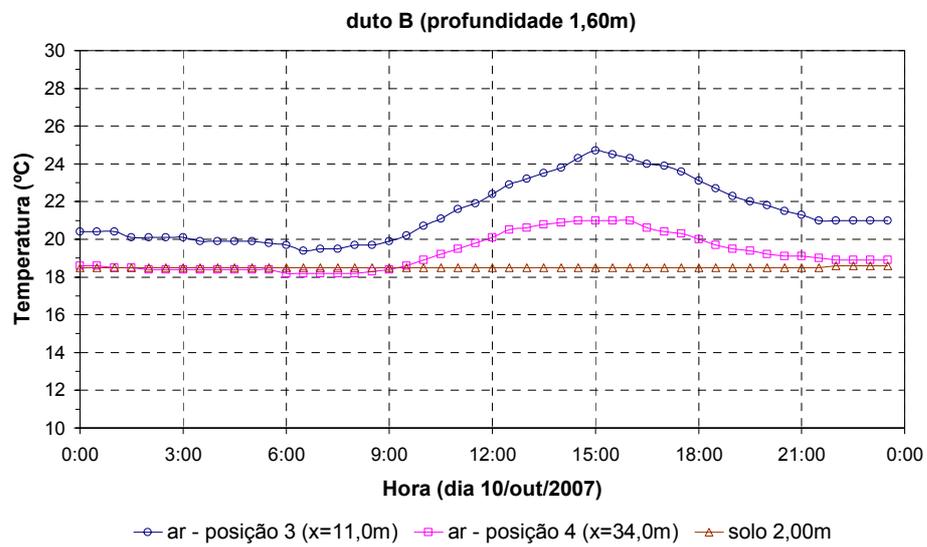
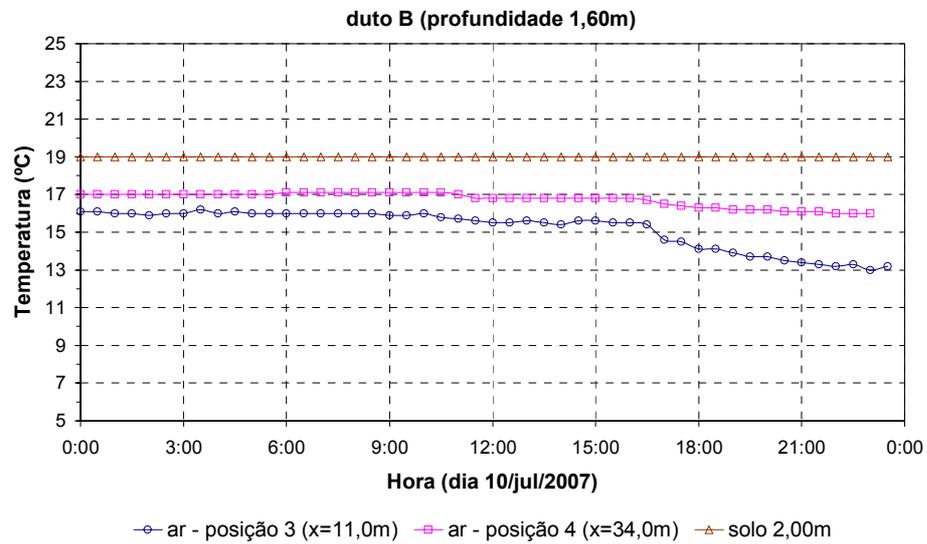


Figura 59: Variação diária da temperatura do ar em escoamento no duto **B**

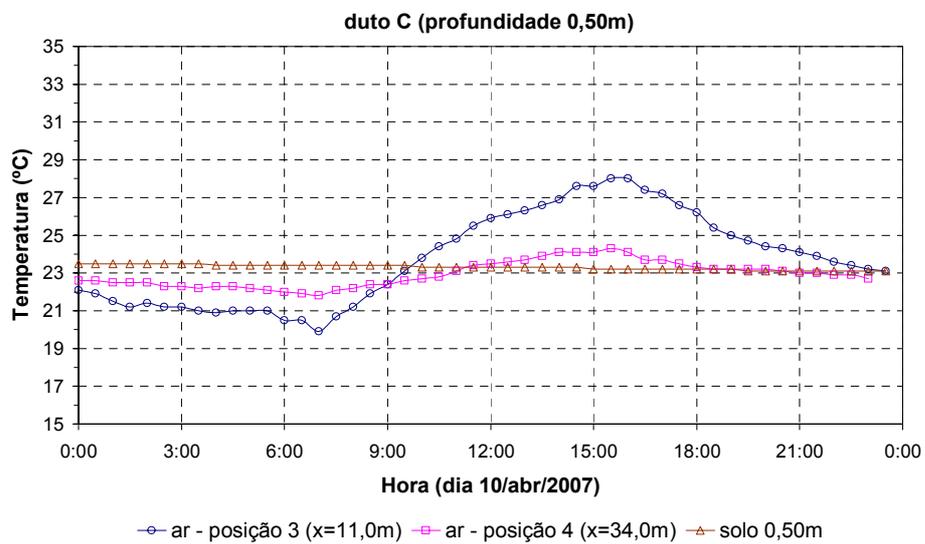
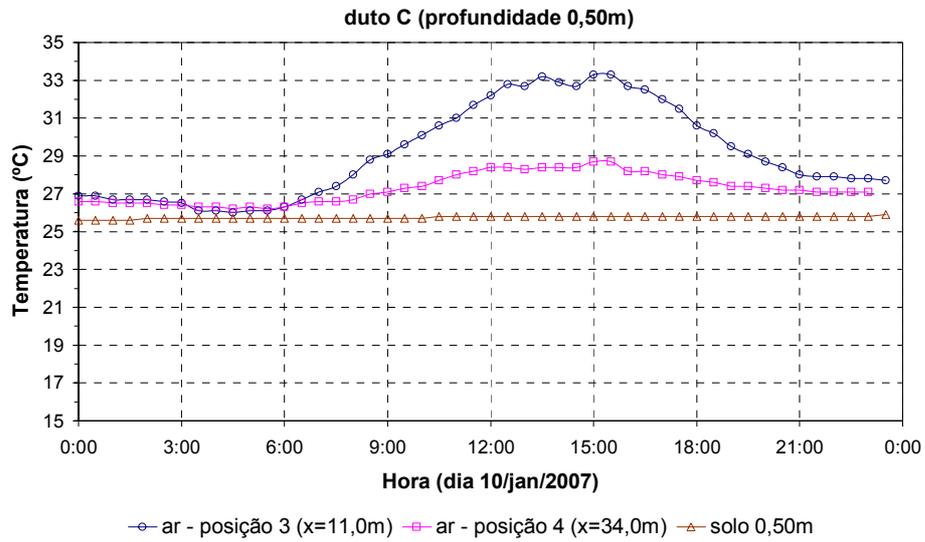


Figura 60 (continua)

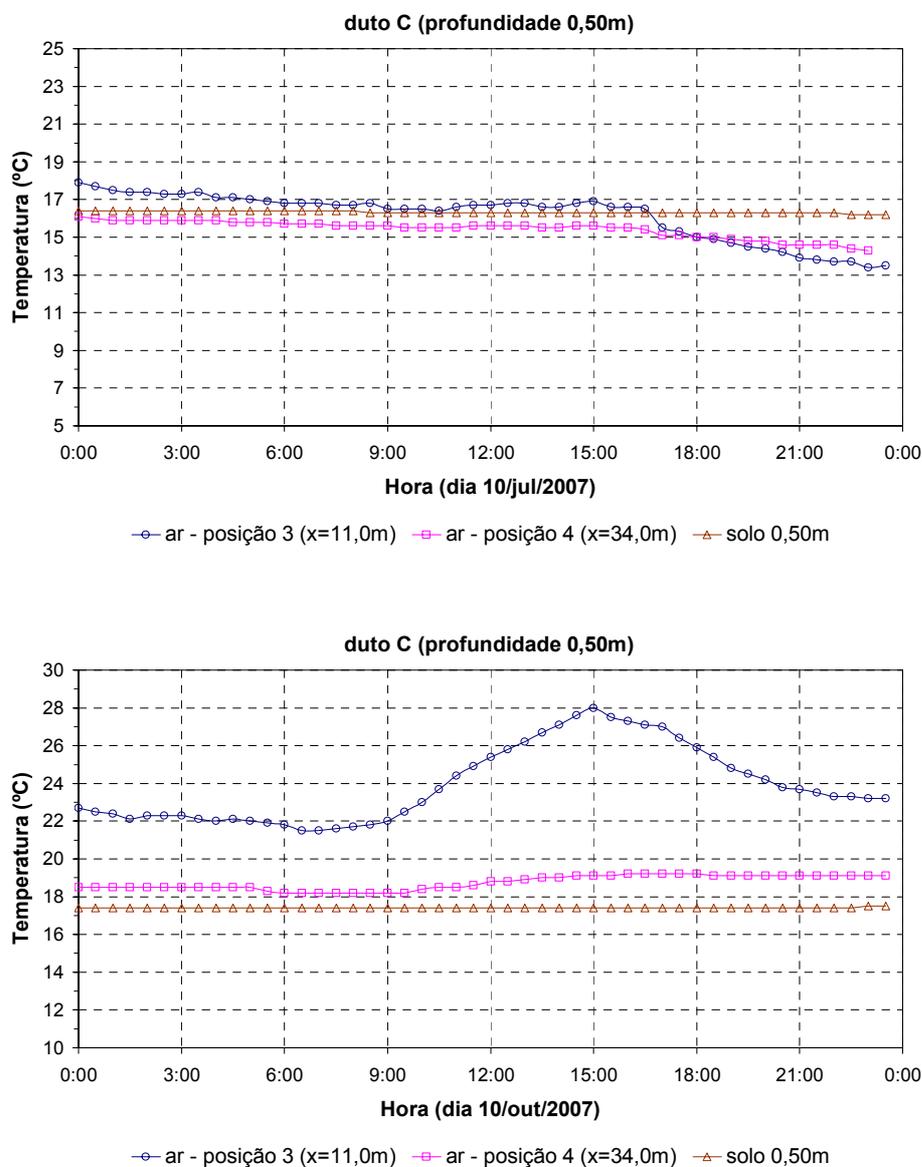


Figura 60: Variação diária da temperatura do ar em escoamento no duto C

As curvas, que compõem as figuras 58, 59 e 60, mostram variações coerentes entre as temperaturas do ar em escoamento nos dutos e a temperatura do solo. Quando o solo apresentou temperatura acima da temperatura do ar, este ar em escoamento esquentou, ao passar pelo duto, e vice-versa. De forma geral, mais nos dutos A e B, ocorreu o esperado: no mês de janeiro (verão), a temperatura do solo esteve abaixo das temperaturas apresentadas pelo ar em escoamento nos dutos enterrados; no mês de julho (inverno), ocorreu o inverso, a

temperatura do solo esteve acima das temperaturas deste ar. Nos meses de abril e outubro (outono e primavera), as temperaturas do solo e do ar em escoamento nos dutos ficaram mais próximas.

O escoamento do ar externo no duto A foi usado, como referência, para análise das trocas térmicas ocorridas nos trocadores de calor solo-ar na pesquisa. Com a finalidade de conhecer a variação de temperatura deste ar, no trecho central do duto (entre as posições de monitoramento 3 e 4), seguindo um procedimento análogo ao usado item 5.6.3, os dados relativos as suas temperaturas foram reorganizados, de forma a permitir a avaliação, a cada registro (meia hora), da correspondente diferença de temperatura, entre as posições de início e fim, deste trecho central, com profundidade constante.

Então, para cada dia do ano de 2007, foram separadas as diferenças positivas, das negativas, tendo por referência a temperatura do ar, na posição de início do trecho monitorado. Os valores positivos foram associados a um diferencial térmico de aquecimento do ar e os valores negativos, a um diferencial térmico de resfriamento do ar. Estas diferenças, tanto as positivas, como as negativas, da mesma forma que no estudo anterior, se mostraram com grande dispersão e, para viabilizar as análises, admitiram-se **valores médios no mês**, determinados conforme os procedimentos e expressões a seguir:

a) cálculo das diferenças de temperatura;

$$\Delta T_{\text{ar duto A}}^j = T_{\text{ar duto A (x=34,0m)}}^j - T_{\text{ar duto A (x=11,0m)}}^j \quad (5.9)$$

b) 1ª análise - $\Delta T_{\text{ar duto A}}^j > 0 \rightarrow$ aquecimento do ar em escoamento, no duto A;

$$\Delta T_{\text{ar duto A}}^j \leq 0 \rightarrow \Delta T_{\text{ar duto A}}^j = 0$$

$$\left(T_{\text{ar duto A (x=34,0m)}} - T_{\text{ar duto A (x=11,0m)}} \right)_{\text{média mensal}} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta T_{\text{ar duto A}}^j}{n} > 0 \quad (5.10)$$

c) 2ª análise - $\Delta T_{\text{ar duto A}}^j < 0 \rightarrow$ resfriamento do ar em escoamento, no duto A;

$$\Delta T_{\text{ar duto A}}^j \geq 0 \rightarrow \Delta T_{\text{ar duto A}}^j = 0$$

$$\left(T_{\text{ar duto A (x=34,0m)}} - T_{\text{ar duto A (x=11,0m)}} \right)_{\text{média mensal}} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta T_{\text{ar duto A}}^j}{n} < 0 \quad (5.11)$$

Nas equações (5.9), (5.10) e (5.11): j , o número do registro de temperatura analisado; n , o número de registros de temperaturas, no mês.

O valor médio mensal, das diferenças positivas de temperaturas, correspondente a equação (5.10), mostrou o aquecimento do ar ao passar pelo trecho central do duto A. Já, o valor médio mensal, das diferenças negativas de temperatura, correspondente a equação (5.11), mostrou o resfriamento deste ar.

A figura 61 apresenta os valores médios mensais destas diferenças, bem como apresenta o número de horas diárias em que a temperatura do ar aumentou, ao passar pelo duto (diferenças positivas) e vice-versa (diferenças negativas).

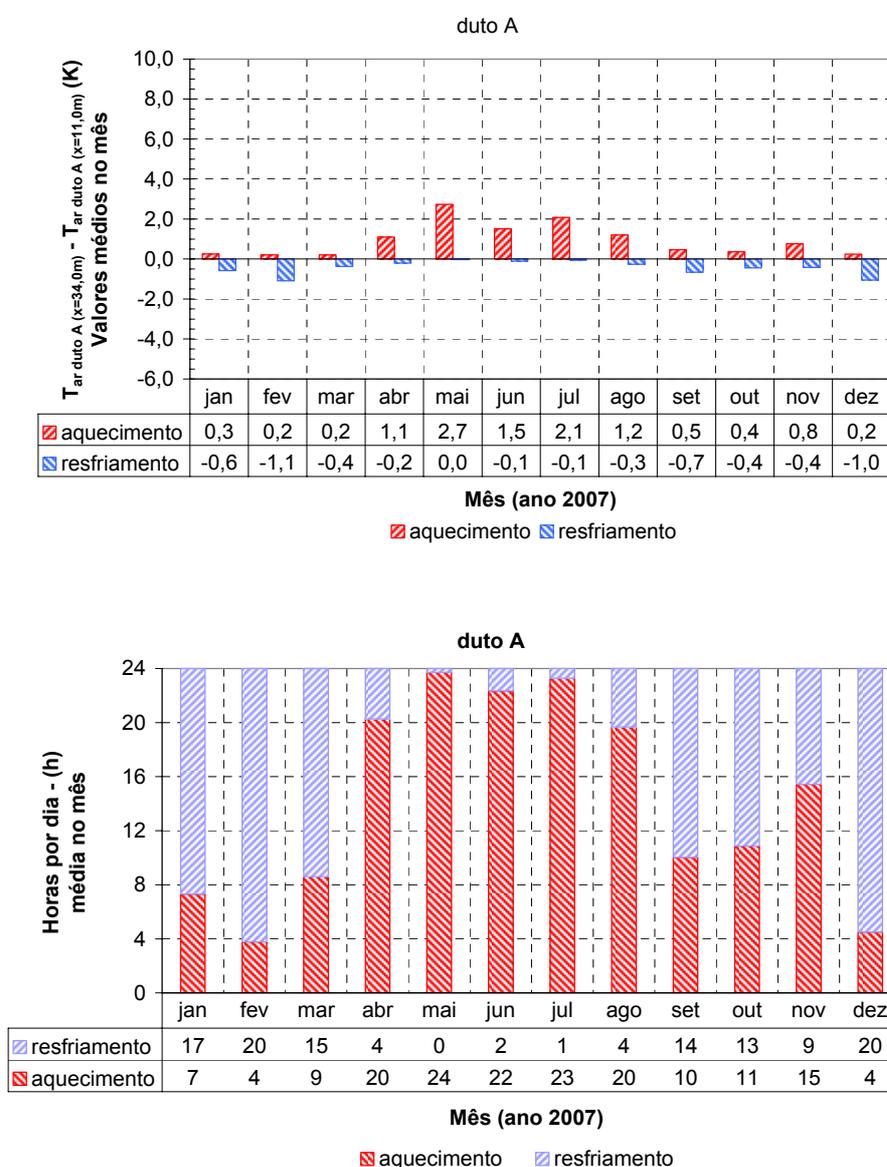


Figura 61: Valores médios, no mês, da diferença $T_{\text{ar duto A}}(x=34,0\text{m}) - T_{\text{ar duto A}}(x=11,0\text{m})$

Nos meses em que o ar mais se aqueceu, ao passar pelo duto, que foram abril, maio, junho, julho e agosto, a temperatura do ar na posição de início manteve-se abaixo da temperatura na posição final do trecho monitorado, entre 20 e 24 horas por dia. Por outro lado, este comportamento se inverteu nos meses em que o ar mais se resfriou ao passar pelo duto, que foram janeiro, fevereiro e dezembro. Neste último caso a temperatura do ar no início manteve-se acima da temperatura no final do trecho monitorado, entre 17 e 20 horas por dia.

A figura 62 compara os resultados anteriores, ou seja, confronta: o aquecimento (curva positiva) ou o resfriamento (curva negativa), correspondente as variações de temperatura do ar em escoamento, no trecho central duto A, posicionado a 1,60 m de profundidade, no experimento, conforme definido na figura 61 (primeiro gráfico), com o potencial térmico do solo, de aquecimento (curva positiva) ou de resfriamento (curva negativa) do ar externo, para operacionalização de trocadores de calor solo-ar, no solo de Viamão, analisado no item 5.6.3 (figura 53), para a profundidade¹⁴ de 2,0 m.

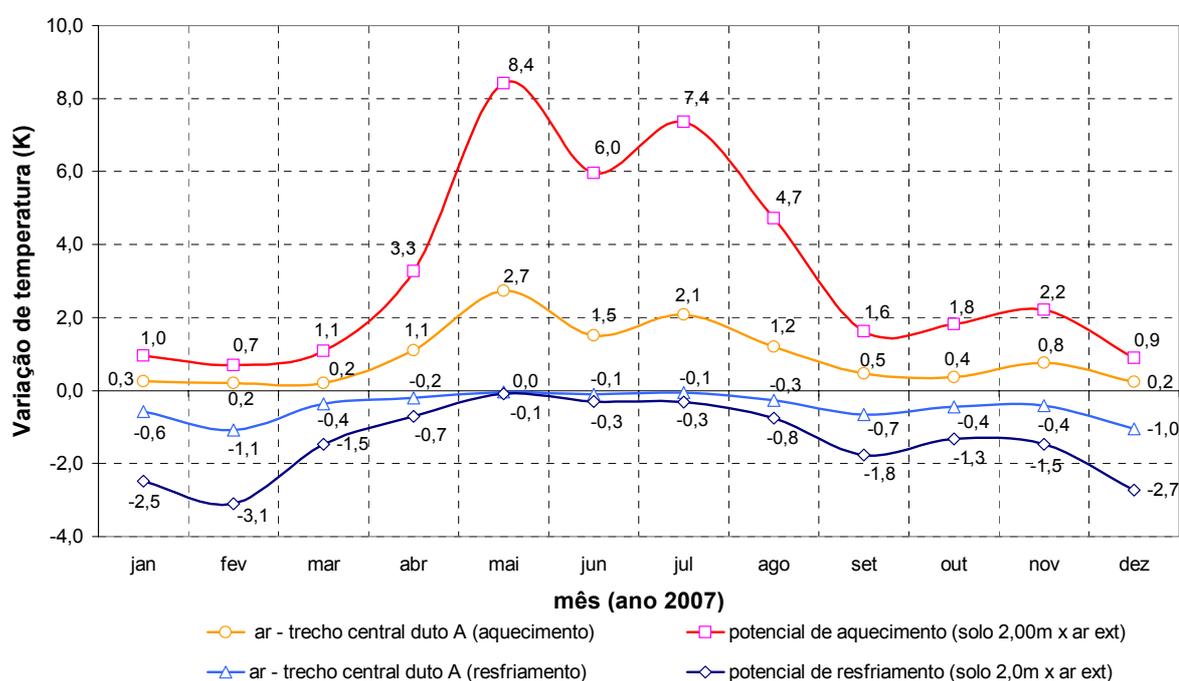


Figura 62: Temperaturas: ar no duto A x potencial (solo 2,0m x ar externo)

¹⁴ Não foram monitoradas, na pesquisa, temperaturas do solo na profundidade de 1,60m. Então, para comparação com o aquecimento ou resfriamento do ar, no duto A, foi usado o potencial do solo em aquecer ou resfriar o ar externo na profundidade de 2,0m.

A observação das curvas apresentadas na figura 62 motivou analisar a relação entre as variáveis confrontadas. Foi usado o modelo de regressão linear, baseado na técnica dos mínimos quadrados, para relacionar as duas variáveis em estudo. Os valores mensais destas variáveis (ordenadas das curvas), que foram usados na análise, estão em destaque na figura.

O resultado, da análise estatística realizada, está apresentado na figura 63. O gráfico mostra que, considerando valores médios mensais, a variação que ocorreu na temperatura do ar em escoamento, no trecho central do trocador de calor solo-ar, tanto na condição de aquecimento, como na condição de resfriamento, foi estimada em 30 % do potencial de troca térmica previsto, pelos dados experimentais, entre o solo e o ar ambiente externo, no local do experimento.

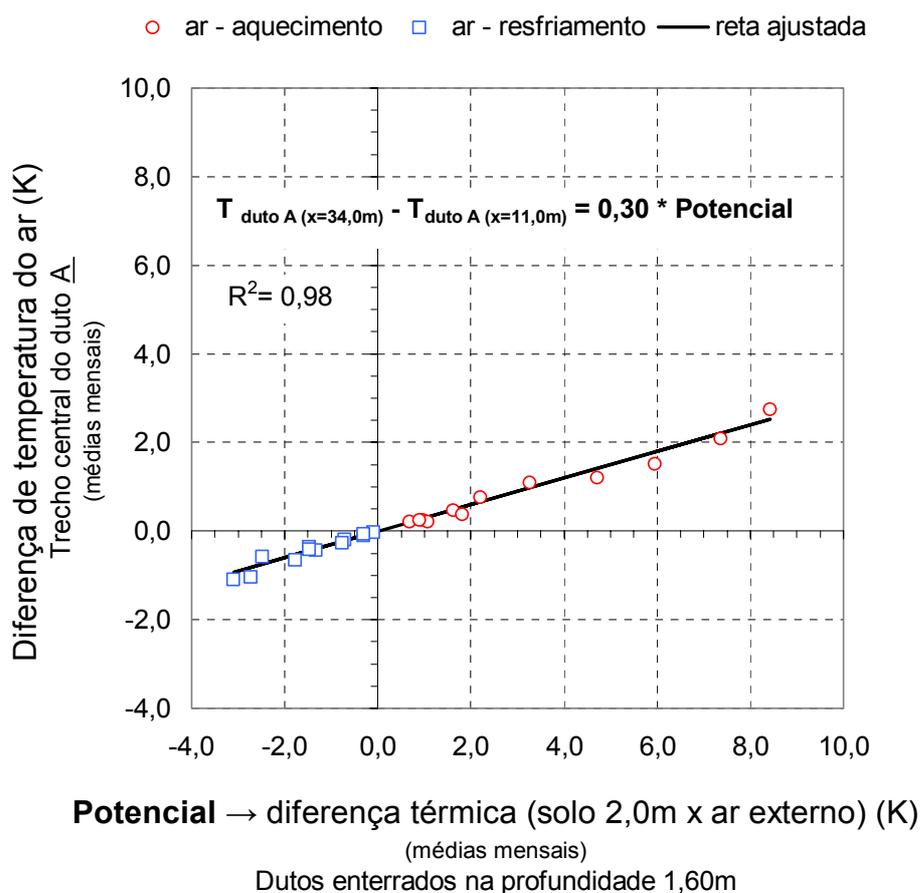


Figura 63: Comparação: ar no duto A x potencial (solo 2,0m x ar externo)

O estudo acima comparou as variações térmicas do ar, em escoamento no trecho central do duto A, com o potencial do solo, na profundidade de 2,0 m, em aquecer ou resfriar o ar externo de Viamão. Assim, como a referência, na análise, foi a temperatura do ar externo, o resultado obtido inclui a influência das várias etapas do sistema, envolvendo as trocas térmicas ocorridas desde a tomada e passagem do ar pelo ventilador (ar externo), onde o ar se aqueceu, passando pelo trecho inicial do duto, parcialmente enterrado, e chegando ao trecho central do duto analisado, enterrado na profundidade de 1,60 m.

Neste contexto, gerou-se a expectativa de analisar, tão especificamente, a troca térmica que ocorreu no trecho central do duto A, ou seja, comparar a variação de temperatura do ar em escoamento no duto, com o potencial do solo, na profundidade do duto¹⁵, em aquecer ou resfriar este próprio ar em escoamento. Para isso, dado que a temperatura do ar varia ao longo do duto, como referência, foi usada a temperatura média do ar, obtida dos valores monitorados na posição inicial do trecho analisado (posição 3 – x=11,0m) e na posição final (posição 4 – x=34,0m).

Foram reorganizados, agora, os dados relativos às temperaturas no solo, na profundidade de 2,0m, e estas temperaturas médias do ar, em escoamento no trecho central do duto A. De forma a permitir a avaliação, a cada registro (meia hora), foram separadas as diferenças positivas, das negativas, tendo por referência a temperatura do solo. Admitindo toda a energia transformada em variação de temperatura, os valores positivos, então, foram associados a uma troca térmica, com potencial de aquecimento do ar em escoamento no próprio duto e os valores negativos, a uma troca térmica com potencial de resfriamento deste ar. Para estas diferenças, tanto as positivas, como as negativas, admitiram-se **valores médios no mês**, determinados conforme os procedimentos e expressões a seguir:

a) cálculo da temperatura média do ar em escoamento no duto A (trecho central);

$$T_{\text{ar duto A (média)}}^j = \frac{1}{2} \cdot (T_{\text{ar duto A (x=34,0m)}}^j + T_{\text{ar duto A (x=11,0m)}}^j) \quad (5.12)$$

b) cálculo das diferenças de temperatura;

$$\Delta T_{\text{solo 2,0m x ar duto A (média)}}^j = T_{\text{solo 2,0m}}^j - T_{\text{ar duto A (média)}}^j \quad (5.13)$$

¹⁵ Na falta, na pesquisa, de dados monitorados de temperatura do solo na profundidade de 1,60 m, o potencial do solo em aquecer ou resfriar o ar em escoamento, no duto A, foi obtido com dados monitorados da temperatura do solo na profundidade de 2,0 m.

c) 1ª análise - $\Delta T_{\text{solo } 2,0\text{m x ar duto A (média)}}^j > 0 \rightarrow$ potencial do solo para aquecimento do ar em escoamento no duto;

$\Delta T_{\text{solo } 2,0\text{m x ar duto A (média)}}^j \leq 0 \rightarrow \Delta T_{\text{solo } 2,0\text{m x ar duto A (média)}}^j = 0$

$$\left(T_{\text{solo } 2,0\text{m}} - T_{\text{ar duto A (média)}} \right)_{\text{média mensal}} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta T_{\text{solo } 2,0\text{m x ar duto A (média)}}^j}{n} > 0 \quad (5.14)$$

d) 2ª análise - $\Delta T_{\text{solo } 2,0\text{m x ar duto A (média)}}^j < 0 \rightarrow$ potencial do solo para resfriamento do ar em escoamento no duto;

$\Delta T_{\text{solo } 2,0\text{m x ar duto A (média)}}^j \geq 0 \rightarrow \Delta T_{\text{solo } 2,0\text{m x ar duto A (média)}}^j = 0$

$$\left(T_{\text{solo } 2,0\text{m}} - T_{\text{ar duto A (média)}} \right)_{\text{média mensal}} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta T_{\text{solo } 2,0\text{m x ar duto A (média)}}^j}{n} < 0 \quad (5.15)$$

Nas equações (5.12), (5.13), (5.14) e (5.15): j , o número do registro de temperatura analisado; n , o número de registros de temperaturas, no mês.

O valor médio mensal, das diferenças positivas de temperaturas, correspondente a equação (5.14), mostrou o potencial térmico do solo, para um sistema de dutos enterrados, visando aquecer o próprio ar em escoamento, no duto. Já, o valor médio mensal, das diferenças negativas de temperatura, correspondente a equação (5.15), mostrou o potencial do solo para resfriar este ar. A figura 64 apresenta os valores médios mensais destas diferenças, entre o solo e ar circulante no duto A.

A figura 65 compara os resultados acima: do aquecimento ou do resfriamento, ocorrido no ar em escoamento, no duto A, posicionado a 1,60m de profundidade, no experimento, conforme mostra a figura 61 (primeiro gráfico); com o potencial térmico do solo, na profundidade de 2,0m, de aquecimento ou de resfriamento do ar em escoamento no próprio duto A, apresentado figura 64.

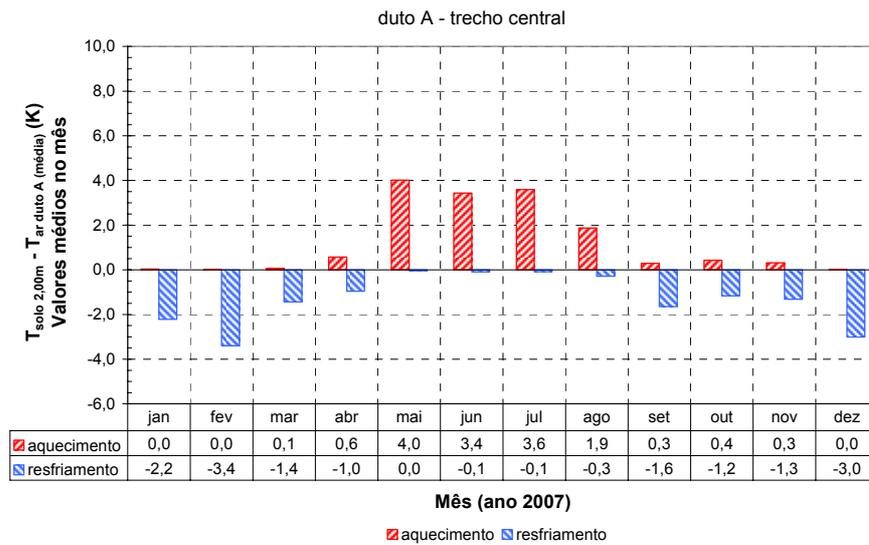


Figura 64: Valores médios, no mês, da diferença $T_{solo\ 2,00m} - T_{ar\ duto\ A}$ (média - trecho central)

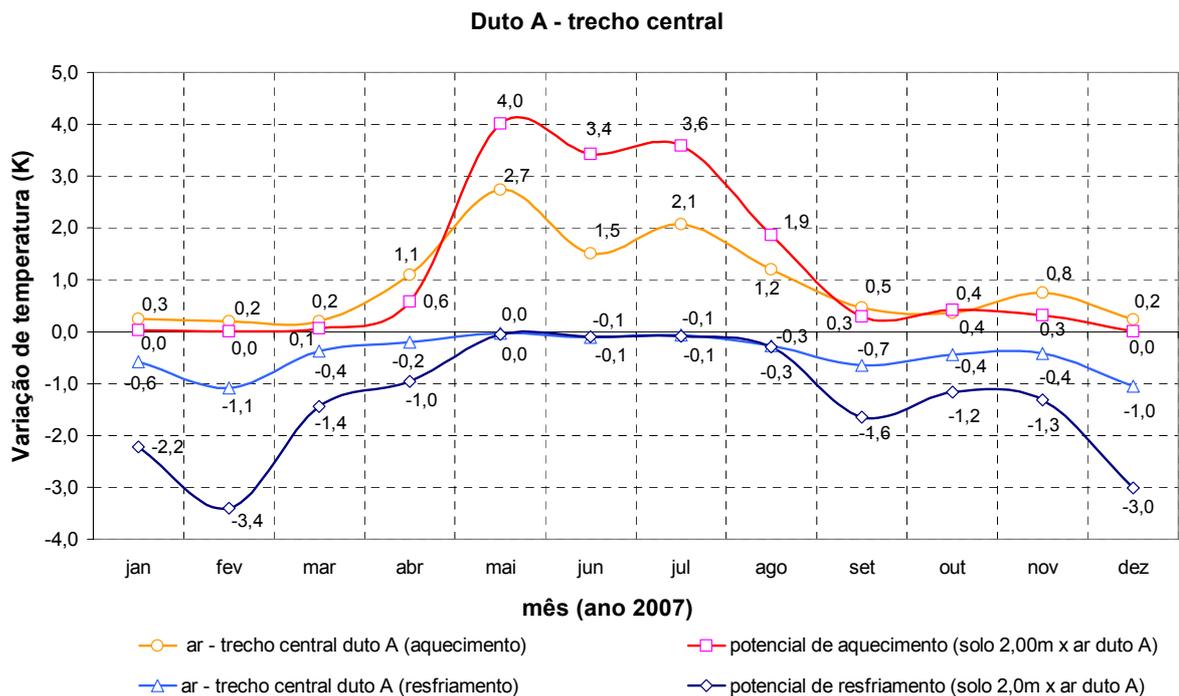


Figura 65: Temperaturas: ar no duto A x potencial (solo 2,0m x ar duto A)

Da mesma forma que na análise anterior, a relação, entre os valores das ordenadas, das correspondentes curvas apresentadas na figura 65, do aquecimento ou do resfriamento do ar, permitiu analisar estatisticamente as duas variáveis em estudo. Também aqui, os valores

mensais destas variáveis (ordenadas das curvas), que foram usados na análise, estão em destaque na figura.

O resultado da relação entre as variáveis em estudo está apresentado na figura 66. O gráfico desta figura mostra que a variação que ocorreu na temperatura do ar em escoamento, no trecho central do trocador de calor solo-ar, tanto na condição de aquecimento, como na condição de resfriamento, considerando valores médios mensais, chegou a 48 % do que poderia atingir, ou seja, do potencial de troca térmica previsto, pelos dados experimentais, neste caso, entre o solo e o ar em escoamento no próprio trecho central do duto A.

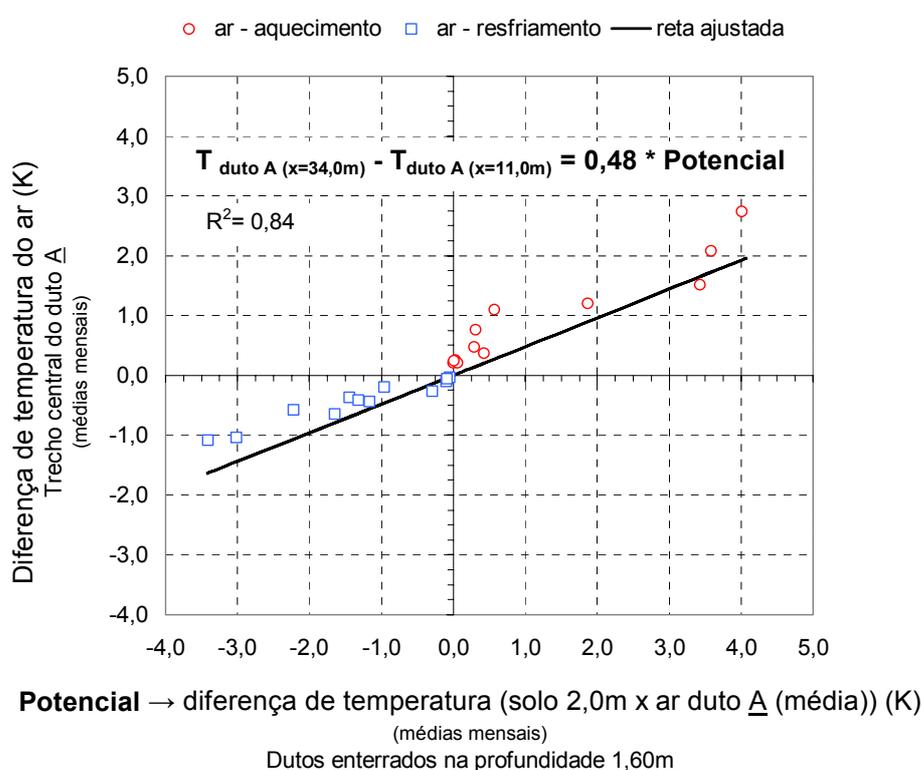


Figura 66: Comparação: ar no duto A x potencial (solo 2,0m x ar duto A)

O estudo acima também foi realizado para o trocador de calor solo-ar, constituído pelo duto B, e os resultados foram muito próximos. Isto se explica porque os dutos A e B foram praticamente iguais, no estudo: mesmo diâmetro e material, enterrados na mesma profundidade (1,60 m) e com trajetórias paralelas, no trecho central analisado. Para o duto C, não foi realizada esta avaliação.

5.6.5 Temperaturas da água no reservatório

Como já referido no texto, as temperaturas da água no reservatório foram registradas em duas posições, uma mais próxima ao fundo e outra mais próxima à superfície da água, pelos sensores ST-201/9 e ST-201/10, respectivamente. Os registros destes sensores só foram efetivos na pesquisa entre 8 de janeiro e 4 de fevereiro de 2007, quando o nível d'água, no reservatório, foi suficiente para cobrir os dois sensores.

O gráfico da figura 67 apresenta as variações da temperatura média diária, para estes dois pontos, mostrando que estas foram muito próximas. A diferença máxima foi de 0,4K, com a temperatura na superfície, maior que no fundo do reservatório, coerentemente com o período monitorado.

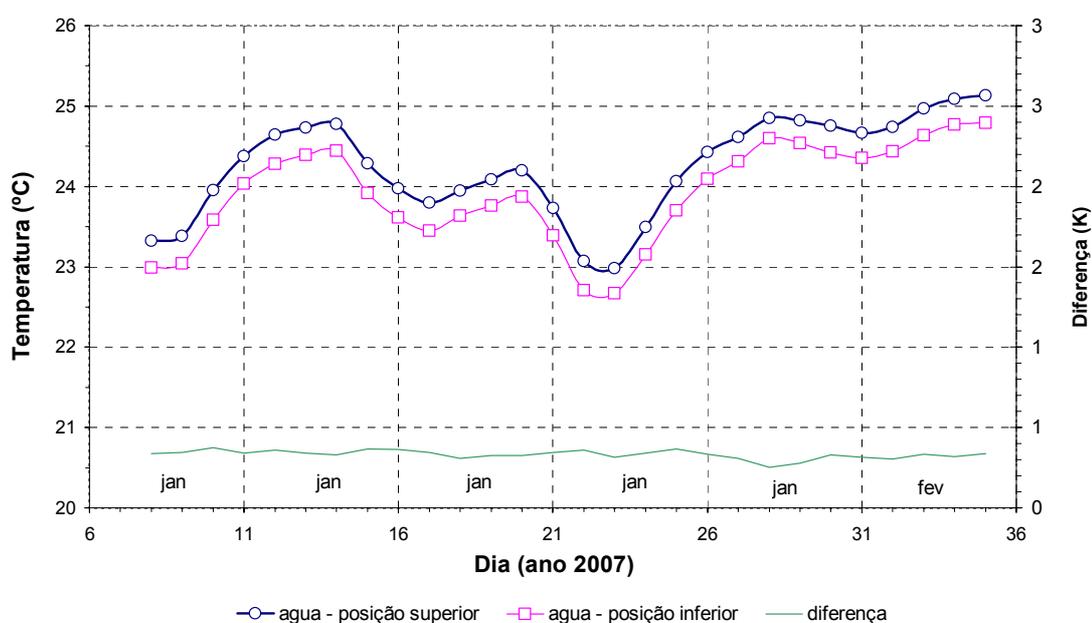


Figura 67: Variações de temperatura da água no reservatório

Como já descrito antes, a água do reservatório, pressurizada por uma bomba, circulou por dutos enterrados, entre reservatório e o trocador de calor colocado no ambiente A, da Casa Ventura, neste período monitorado. Embora a tomada e o retorno da água tenham sido posicionados em pontos opostos no reservatório (ver figura 32), esta circulação movimentou a água próximo aos sensores de registro das temperaturas, o que contribuiu para a proximidade entre as temperaturas mostradas no gráfico da figura 67.

O primeiro gráfico da figura 68 compara a temperatura média da água no reservatório, com a temperatura do ar externo. Seguindo, novamente, um procedimento análogo ao usado no item 5.6.3, foi avaliado o potencial térmico da água do reservatório, em relação ao ar externo, visando a operacionalização de um sistema inteligente de trocas térmicas, para aquecimento ou resfriamento deste ar. O segundo gráfico da figura 68 mostra esta avaliação. O potencial térmico se revelou pequeno, no período monitorado: para aquecimento do ar, o **valor médio diário** no período ficou em 1,8K e, para resfriamento, em -1,7K. Relacionando-se estes valores médios, no período monitorado (verão), a água do reservatório, na média, apresentou temperatura superior à do ar externo, por 12 horas, e inferior, por outras 12 horas, durante cada dia do período.

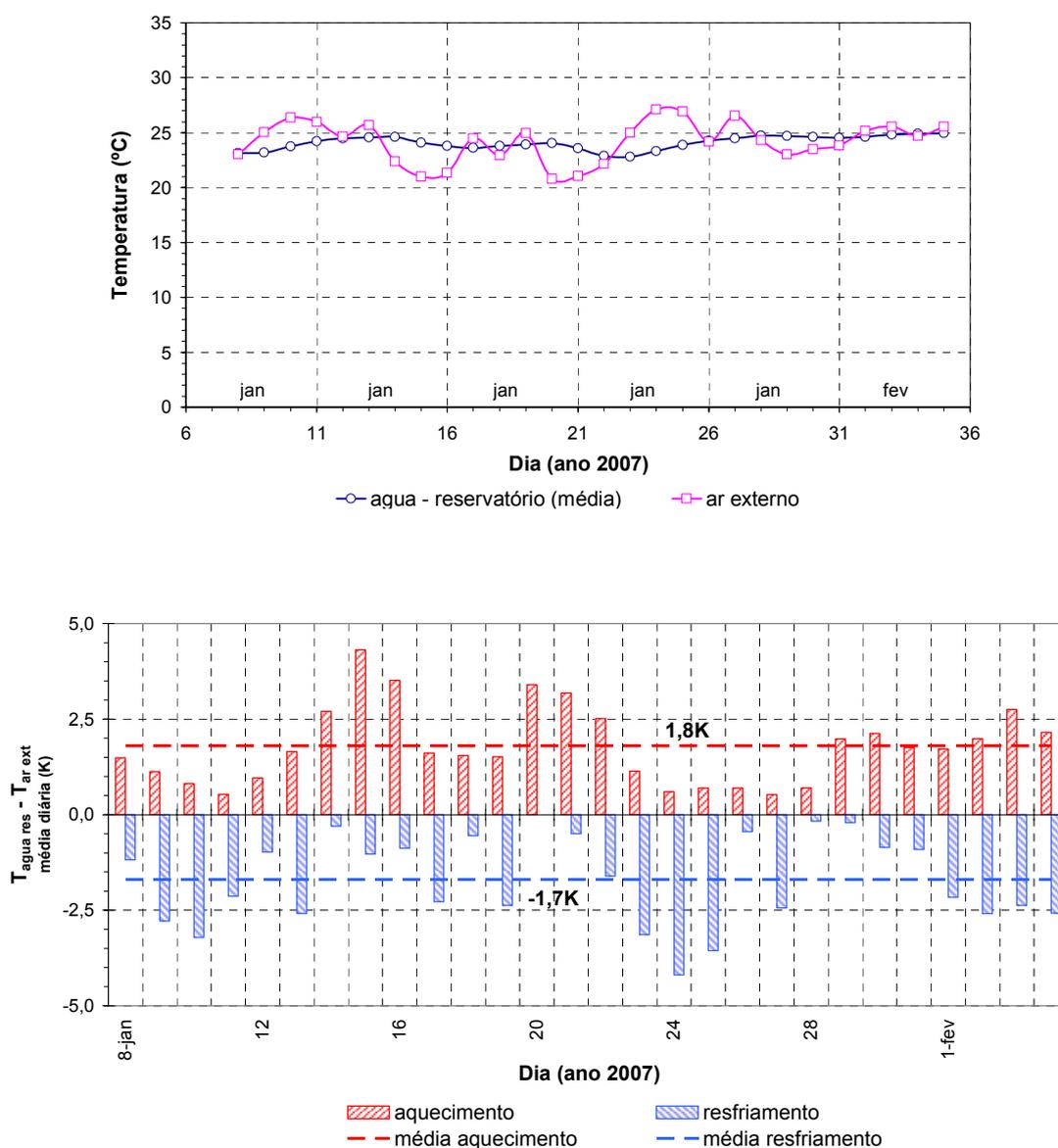


Figura 68: Potencial térmico da água do reservatório em relação ao ar externo

5.6.6 Temperaturas da água entre o reservatório e o *fan-coil*

A água do reservatório, como já descrito no texto, foi usada no experimento para circular pela serpentina de um *fan-coil*, colocado no ambiente A da Casa Ventura, com o objetivo de trocar calor com o ar deste ambiente, circulado pela parte externa desta serpentina. Uma bomba centrífuga foi responsável pela circulação da água na tubulação de polipropileno. Com 32 mm de diâmetro, esta rede interligou fisicamente o reservatório e o *fan-coil*, a partir de um trecho de recalque e outro, de retorno da água ao reservatório, como ilustra a figura 33.

A temperatura da água foi registrada por quatro sensores instalados neste circuito: dois sensores, ST-202/11 e ST-204/31, no trecho de recalque; o primeiro, próximo à posição de saída da água do reservatório (posição b – figura 32); e, o segundo, próximo à posição de entrada da água no *fan-coil* (posição c – figura 32); e mais dois sensores, ST-204/32 e ST-202/12, no trecho de retorno da água ao reservatório; o primeiro, próximo à posição de saída da água do *fan-coil* (posição d – figura 32); e, o segundo, próximo à posição de entrada da água no reservatório (posição e – figura 32). Seguindo o que ocorreu com os sensores que monitoraram a temperatura da água no reservatório, estes sensores também só foram efetivos na pesquisa entre 8 de janeiro e 4 de fevereiro de 2007.

A figura 69 mostra as leituras, para os quatro sensores, no período de verão em que houve circulação de água no sistema. Cada gráfico da figura apresenta um trecho monitorado na pesquisa e a correspondente diferença de temperatura observada: a água saída do reservatório aqueceu 0,4K, em média, no período, ao passar pelo trecho de recalque da tubulação parcialmente enterrada; novamente, aqueceu 0,8K, em média, no período, ao passar pela serpentina do *fan-coil*; e, por fim, resfriou 0,6K, em média, no período, ao passar pelo trecho da tubulação parcialmente enterrada, no retorno ao reservatório.

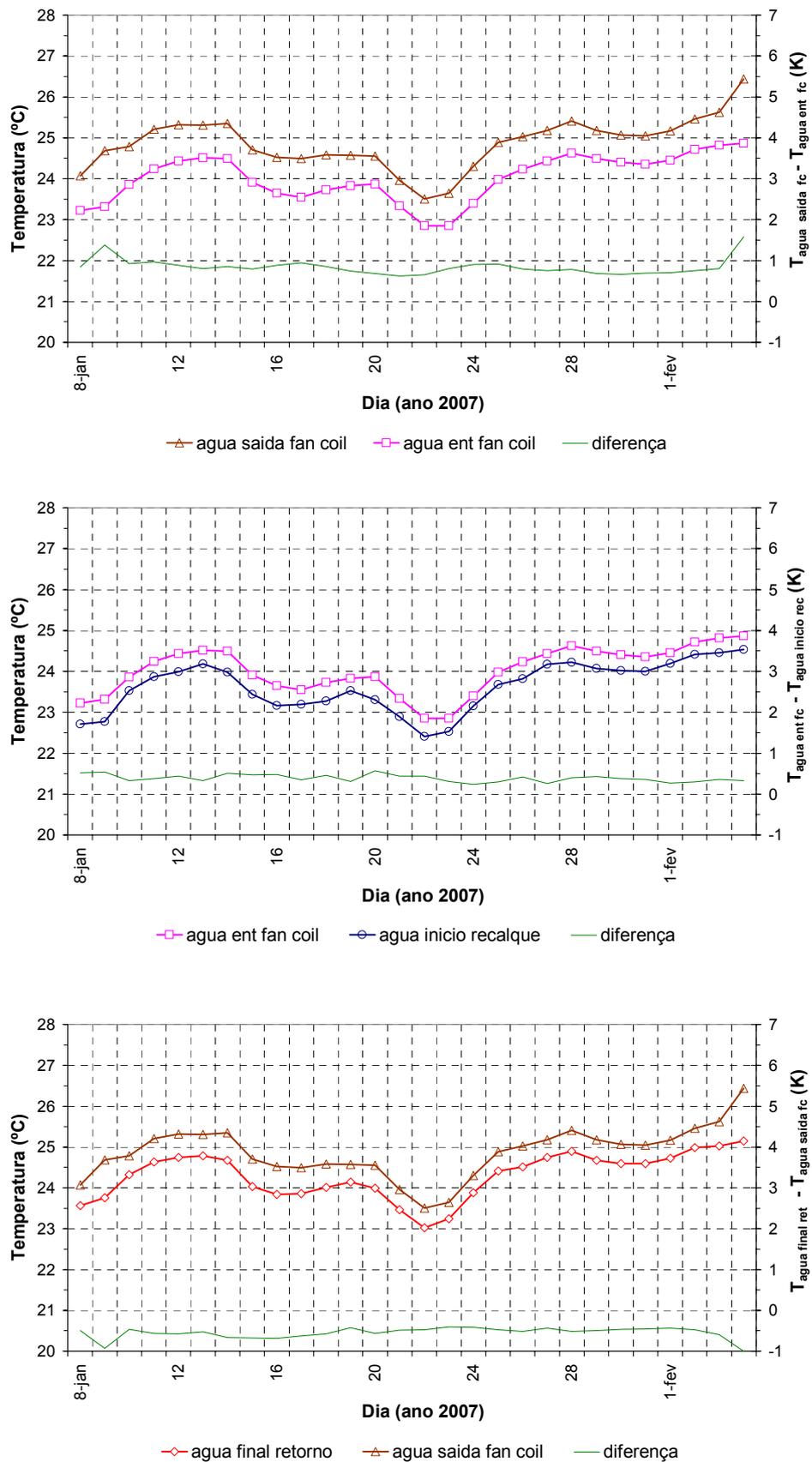


Figura 69: Variação da temperatura da água entre o reservatório e o *fan-coil*

O processo de troca térmica entre o ar e a água deu-se no *fan-coil*. A água passando pela serpentina do equipamento e o ar do ambiente A circulando pela parte externa desta serpentina, pela ação do ventilador do equipamento, trocaram calor, conforme se pode deduzir da diferença entre as temperaturas da água, na entrada e na saída do *fan-coil*, mostrada no segundo gráfico da figura 69. A água se aqueceu, em média, 0,8K, retirando calor do ar do ambiente A, o que é analisado no item a seguir, na abordagem do comportamento das temperaturas dos ambientes A e B, da Casa Ventura.

5.6.7 Temperaturas do ar interno aos ambientes A e B

O ar interno ao ambiente A, da Casa Ventura, foi permanentemente renovado durante o período do experimento, com ar proveniente do duto A, na proporção de uma vez e meia o volume do ambiente por hora; e o ambiente B, que não teve renovação de ar, foi mantido fechado, para reproduzir as condições naturais, decorrentes do desempenho térmico natural do ambiente, frente às variações climáticas no local. Além disso, o ar do ambiente A também foi constantemente circulado pelo ventilador do *fan-coil*, existente no ambiente, visando sua homogeneização, dado o processo de renovação. Relembrando o descrito no item anterior, no período entre 8 de janeiro e 4 de fevereiro circulou, pela serpentina deste *fan-coil*, água proveniente do reservatório, ajudando a resfriar o ar do ambiente, quando de sua passagem pela parte externa da serpentina. Fora deste período, só o ar continuou a ser circulado pelo *fan-coil*.

As variações de temperatura do ar foram monitoradas por quatro sensores, conforme mostra a figura 32: sensor ST-108/29, que registrou as temperaturas internas no ambiente A; sensor ST-109/35, que registrou as temperaturas internas no ambiente B; sensor ST-205/33, que registrou as temperaturas do ar de renovação, na posição de entrada no ambiente A (posição 5 - posição de saída do ar do duto A), junto à tomada de ar do *fan-coil*; e sensor ST-205/34, que registrou a temperatura do ar na saída do *fan-coil*.

A figura 70 compara as variações das temperaturas do ar, em ambos os ambientes, com a variação de temperatura do ar externo de Viamão, mostrando que a edificação respondeu termicamente de forma bastante adequada, em relação às oscilações de temperatura do ar externo. Enquanto, no ano de 2007, a temperatura do ar externo variou entre valores negativos de -1 °C e máximos superiores a 36 °C, a temperatura do ambiente A oscilou entre limites mais confortáveis, pouco abaixo dos 13 °C e pouco acima dos 30 °C. Com a mesma tendência, no ambiente B, a oscilação ficou entre 11 °C e 31 °C.

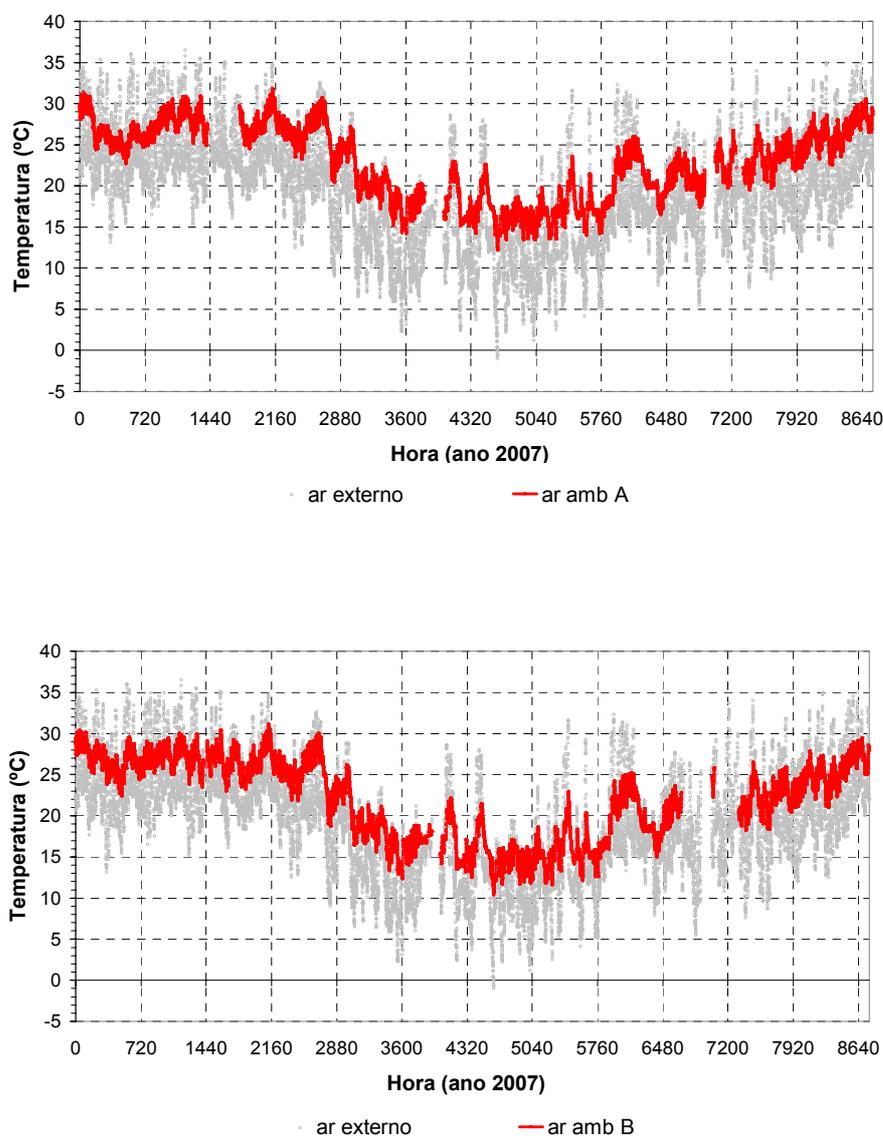


Figura 70: Variações de temperaturas do ar no ambiente A e no ambiente B

Continuando a análise, a figura 71 compara, diretamente, as médias diárias das variações de temperatura do ar nos ambientes, mostrando que o ar do ambiente A foi, na média, mais frio do que o ar do ambiente B, por quase todo o mês de janeiro e início de fevereiro (período coincidente com a circulação de água pelo *fan-coil*) e mais quente no resto do ano de 2007. A máxima diferença de temperatura com o ambiente A, na condição mais fria; em relação ao ambiente B, foi de -1,5K e ao contrário, com o ambiente A mais quente, foi de 1,9K.

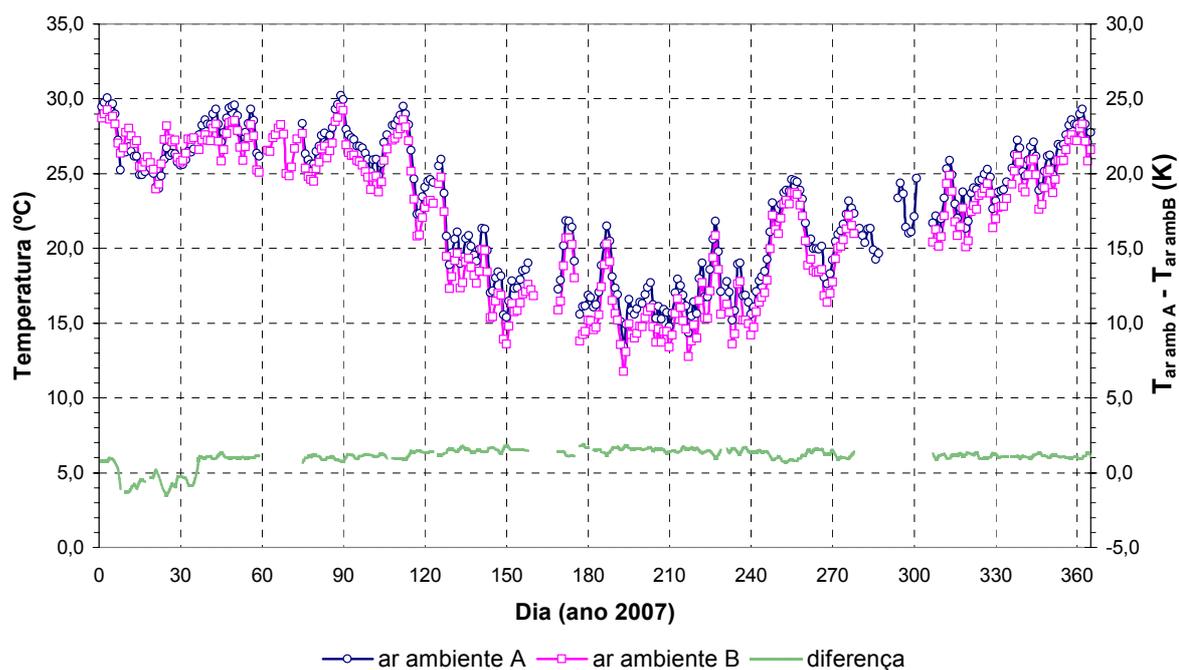


Figura 71: Comparação, entre médias diárias das temperaturas, nos ambientes A e B

A figura 72 corrobora os resultados acima, apresentando as variações diárias das temperaturas nos dois ambientes, privilegiando os dias 15, dos meses de janeiro, fevereiro, julho e agosto de 2007. Entre estes dias, com exceção do dia 15 de janeiro, incluído no período em que houve circulação de água no trocador de calor do *fan-coil*, a temperatura do ambiente A sempre esteve acima da temperatura do ambiente B.

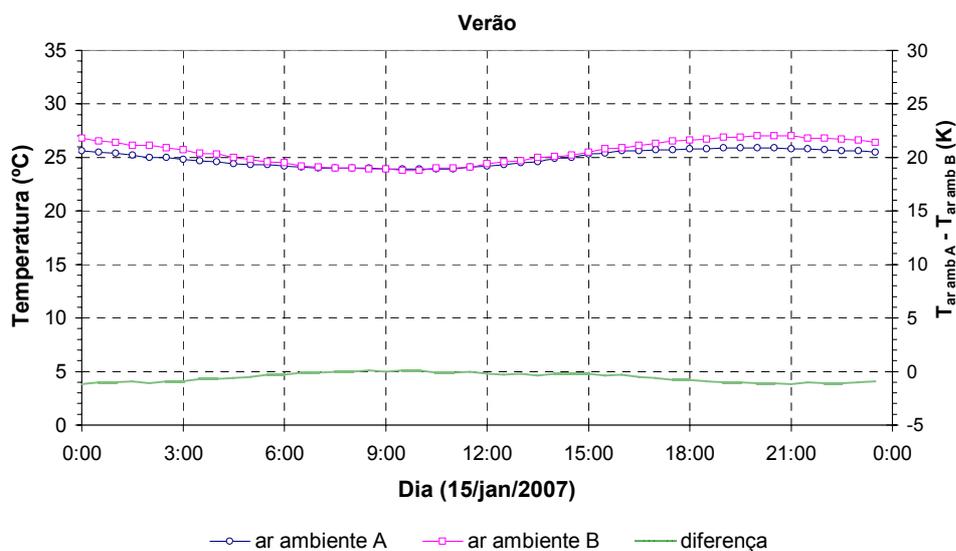


Figura 72 (continua)

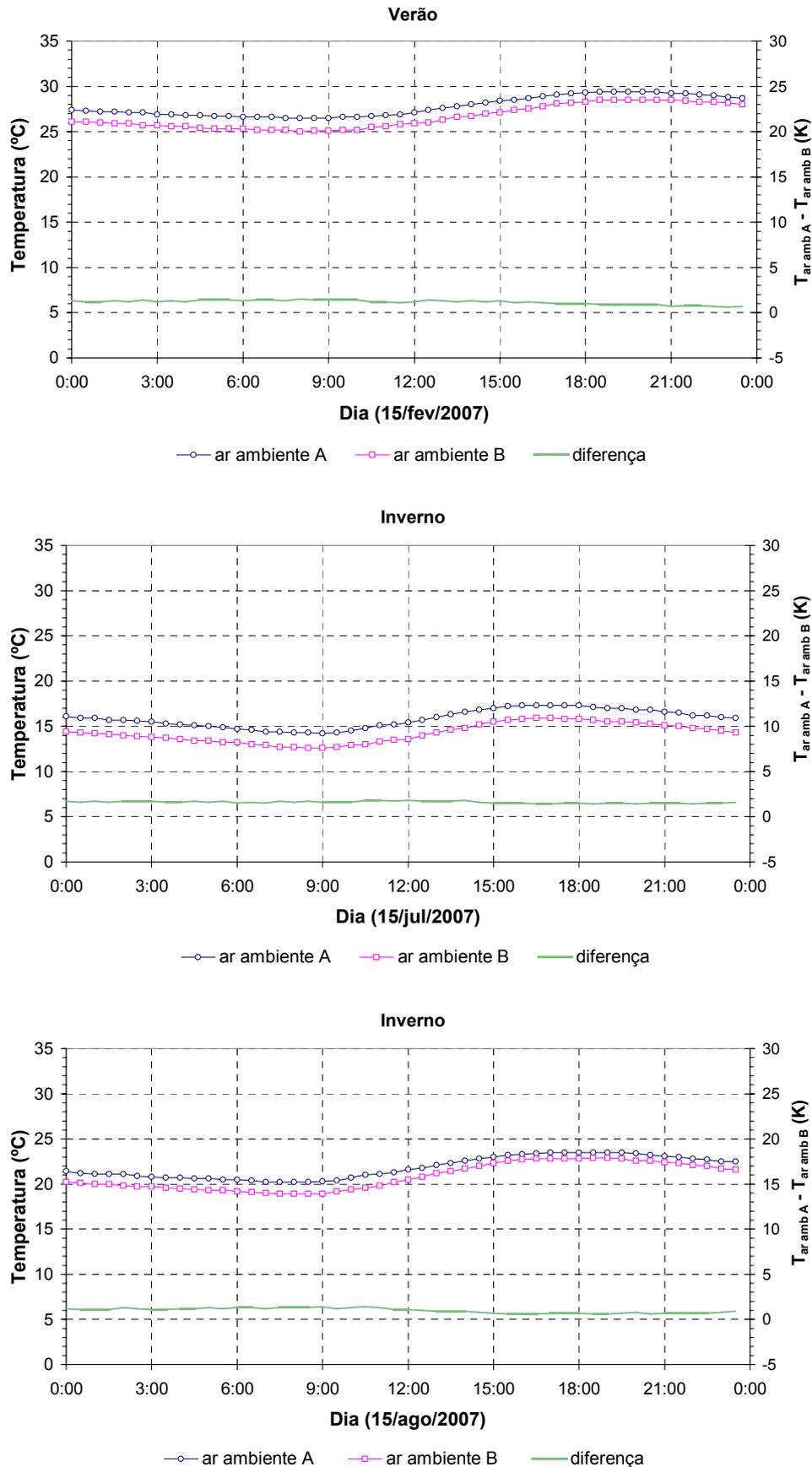


Figura 72: Variação diária da temperatura nos ambientes A e B

Como se percebe nos escritos acima, o que difere entre os ambientes, em termos de temperatura do ar interno, deve-se, principalmente, aos processos de renovação do ar e de circulação deste ar misturado com o ar do ambiente, pelo ventilador do *fan-coil*, no ambiente A, processos estes que não ocorreram no ambiente B. Portanto, na sequência do texto, estes processos são analisados, em função das temperaturas e vazões do ar.

A figura 73 apresenta os valores médios diários das temperaturas envolvidas nestes processos: temperatura do ar externo de Viamão; temperatura do ar de renovação (ar que sai do trocador de calor solo-ar, para o interior do Ambiente A); temperatura do ar interno ao Ambiente A; e a temperatura do ar de renovação, misturado com o ar do ambiente, após passar pelo ventilador do *fan-coil*.

O ar de renovação, como descrito antes, foi captado no ambiente externo, trocou calor continuamente com o solo e chegou ao ambiente A, para se misturar ao ar interno. Observa-se que, ao trocar calor com o solo, o ar estabilizou sua temperatura: enquanto a temperatura média diária do ar externo variou entre 5,5 °C e 28,2 °C, com média de 18,9 °C, o ar de renovação variou entre 14,7 °C e 27,0 °C, com média de 21,3 °C. Isto garantiu a renovação do ar do ambiente, sem comprometer a resposta térmica da edificação, em relação às condições ambientes, a qual, como referido acima, foi muito boa.

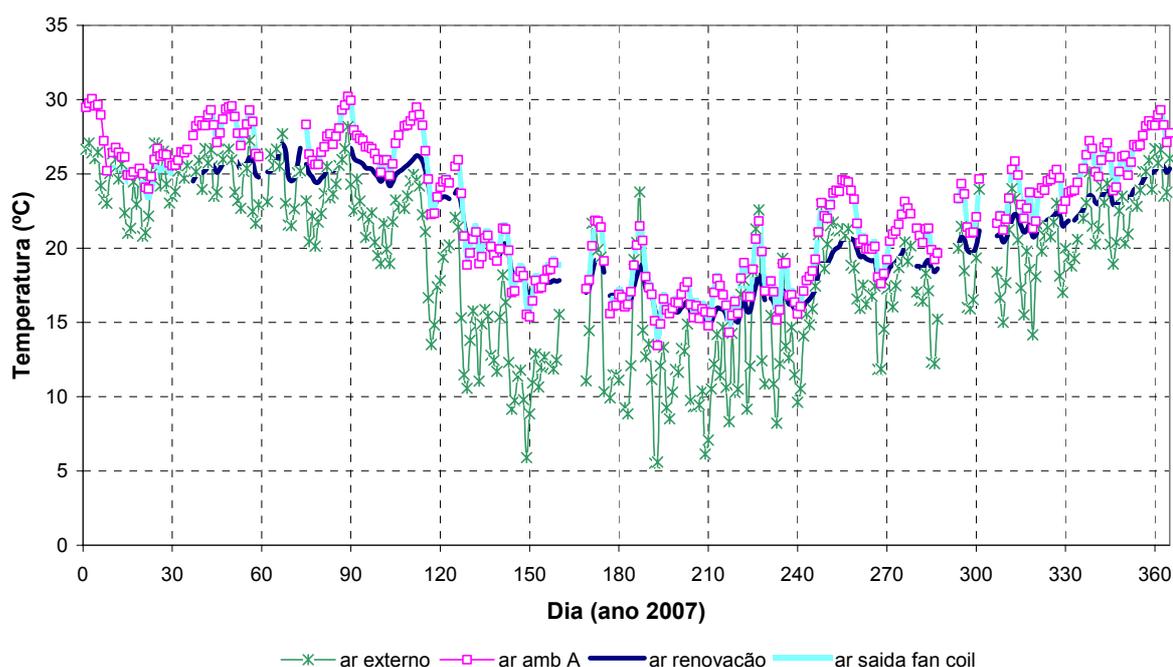


Figura 73: Variação diária da temperatura no ambiente A

Conforme analisado no item 5.6.4, quando da análise das temperaturas do ar em escoamento nos trocadores de calor solo-ar, o processo de renovação do ar no ambiente interno poderia ser controlado, em função de sua melhor contribuição para a temperatura interna. Se um sistema inteligente de gerenciamento da operacionalização das trocas de temperatura, entre o solo e o ar circulante nos dutos enterrados fosse adotado, a renovação ocorreria com ar proveniente dos dutos enterrados ou diretamente com ar externo, dependendo da comparação entre temperaturas.

A figura 74 compara as variações de temperatura ocorridas no ar de renovação, com as ocorridas no ar interno ao ambiente A. O potencial do ar de renovação foi preferencialmente de resfriamento do ar ambiente, o que se mostra adequado a uma situação de ocupação do ambiente, com a consequente geração de calor no seu interior e a necessidade de removê-lo, a partir deste processo de renovação do ar.

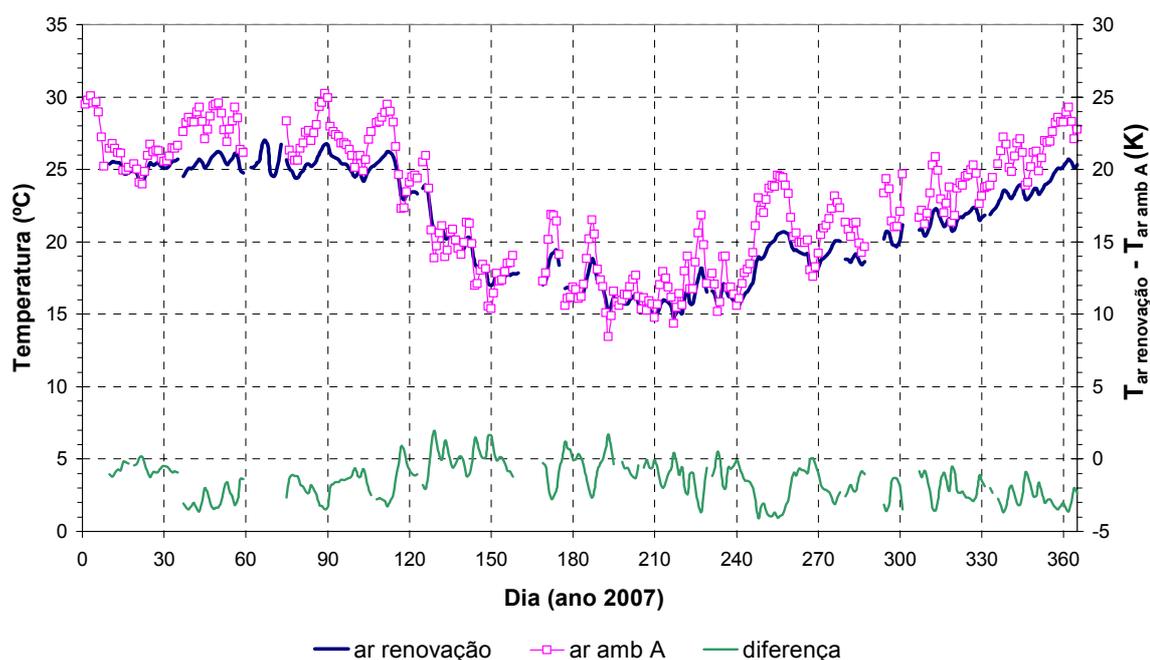


Figura 74: Comparação, entre as temperaturas, do ar de renovação e do ambiente interno

Usando o mesmo procedimento adotado para verificar o potencial do solo em aquecer o ar externo, descrito no item 5.6.3, a figura 75 detalha este potencial do ar de renovação, de aquecer ou resfriar o ar do ambiente interno, verificado para cada mês do ano de 2007. Os

valores apresentados são médias mensais, obtidas dos dados monitorados na pesquisa, que servem como referência para complementar a compreensão qualitativa do fenômeno.

O mês de março, como já referido, foi atípico no ano de 2007, com temperaturas mais baixas do que o normal para a época do ano, e gerou uma condição especial para aquecimento do ambiente. Nos demais meses do ano, predominou o resfriamento, com um potencial que variou entre -1,4K e -5,2K, e, quase sempre, durante todas as horas do dia.

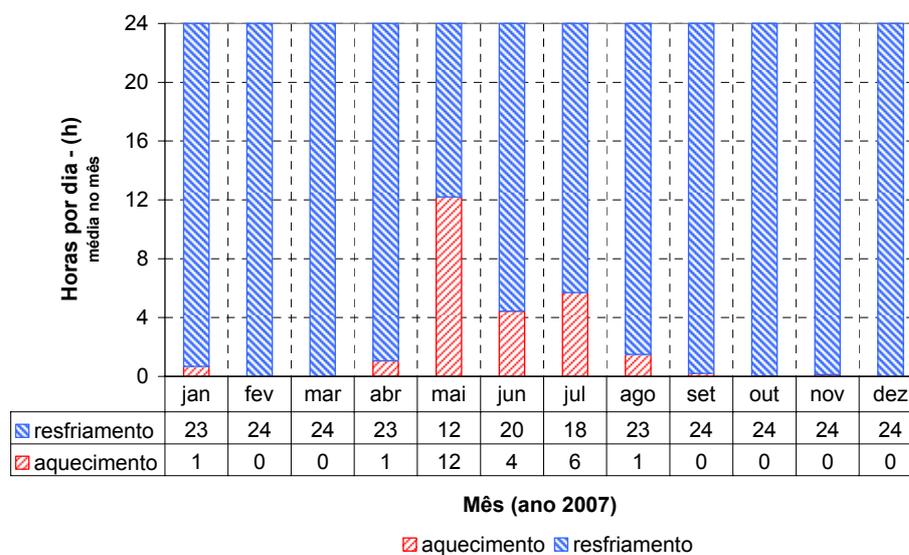
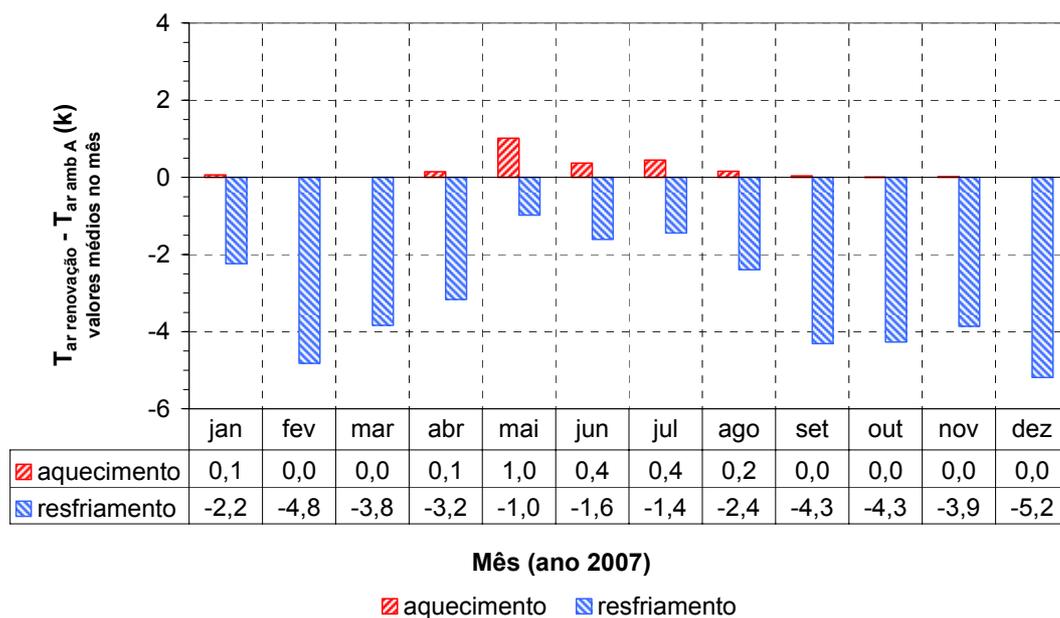


Figura 75: Potencial do ar de renovação para aquecer ou resfriar o ar do ambiente A

Na continuação, analisa-se a passagem do ar pelo *fan-coil*, no interior do ambiente A. O ventilador deste equipamento tem vazão de 637 m³/h e o ar circulante compôs-se pelo ar de renovação, procedente do duto A (88,1 m³/h) e pelo ar do próprio ambiente (637 m³/h – 88,1 m³/h), cujas variações de temperaturas já foram apresentadas na figura 74. Na entrada do *fan-coil*, na falta de um monitoramento direto, a temperatura foi definida pela proporção entre as vazões e as respectivas variações de temperaturas e, na saída, a temperatura do ar foi obtida diretamente dos registros do sensor ST-205/34; esta última, também já apresentada na figura 74. A figura 76 compara as temperaturas do ar, ao passar pelo *fan-coil*.

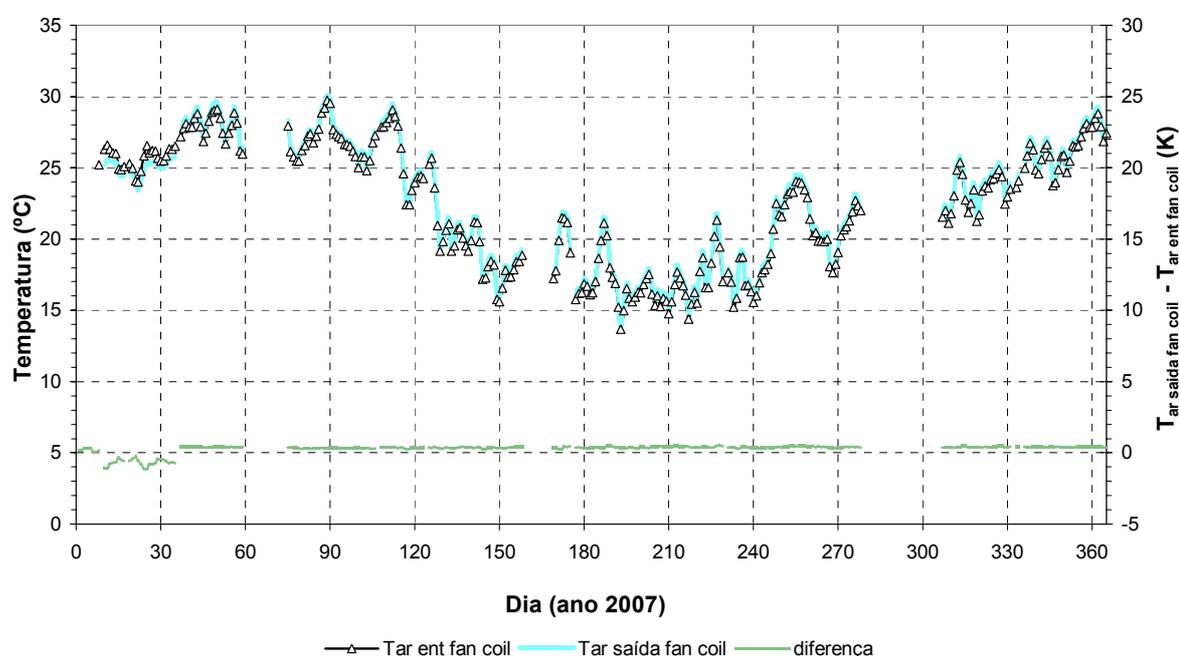


Figura 76: Variação da temperatura do ar, ao passar no *fan-coil*

Observa-se que, ao passar pelo *fan-coil*, o ar se esfriou durante quase todo o mês de janeiro e início de fevereiro (período coincidente com a circulação de água pelo *fan-coil*) e esquentou no resto do ano de 2007. A máxima diferença de temperatura, na condição resfriamento do ar, foi de -1,2K e ao contrário, no aquecimento, foi de 0,5K.

Esta diminuição de temperatura do ar, ao passar pela serpentina do *fan-coil*, foi compatível e simultânea ao aumento de temperatura da água, ao passar pelo interior desta serpentina, como foi verificado na análise da circulação da água por esta serpentina, feita no item 5.6.6. A água circulante absorveu o calor do ar, no período de resfriamento. Por outro lado, houve aumento

de temperatura do ar, no restante do período analisado, quando o ar circulou sozinho pelo *fan-coil*, o que, em princípio, pode se justificar pela dissipação de calor no motor elétrico (140 W) do ventilador, permanentemente em funcionamento na experimentação. O não monitoramento da temperatura do ar, na posição de entrada, e dos teores de umidade relativa do ar, na passagem pelo *fan-coil*, no experimento, prejudicou a análise mais precisa dos fenômenos envolvidos no processo e a própria discussão de seu balanço térmico. No estudo do ambiente, entretanto, isto não foi uma limitação, dado que a temperatura do ar, na saída do *fan-coil*, foi monitorada, como já referido, pelo sensor ST-205/34.

Para estimar a influência dos processos de renovação e circulação, pelo *fan-coil*, do ar no ambiente A, foi admitido que, em regime, o equilíbrio de temperaturas entre este ar, vindo do *fan-coil*, e o ar do ambiente, estabeleceu-se apenas por trocas de calor sensível, no volume do ambiente; ou seja, que as trocas de calor com as superfícies do contorno do ambiente foram pequenas e que não ocorreu, em qualquer forma, o fenômeno de condensação. Assim, foi possível estimar uma variação de temperatura para o ambiente A, caso o ar não tivesse sido renovado e circulado pelo *fan-coil*, ou seja, que o ambiente A tivesse sido mantido nas mesmas condições do ambiente B. A figura 77 apresenta esta variação de temperatura estimada para o ambiente A, bem como a curva ajustada aos valores médios diários.

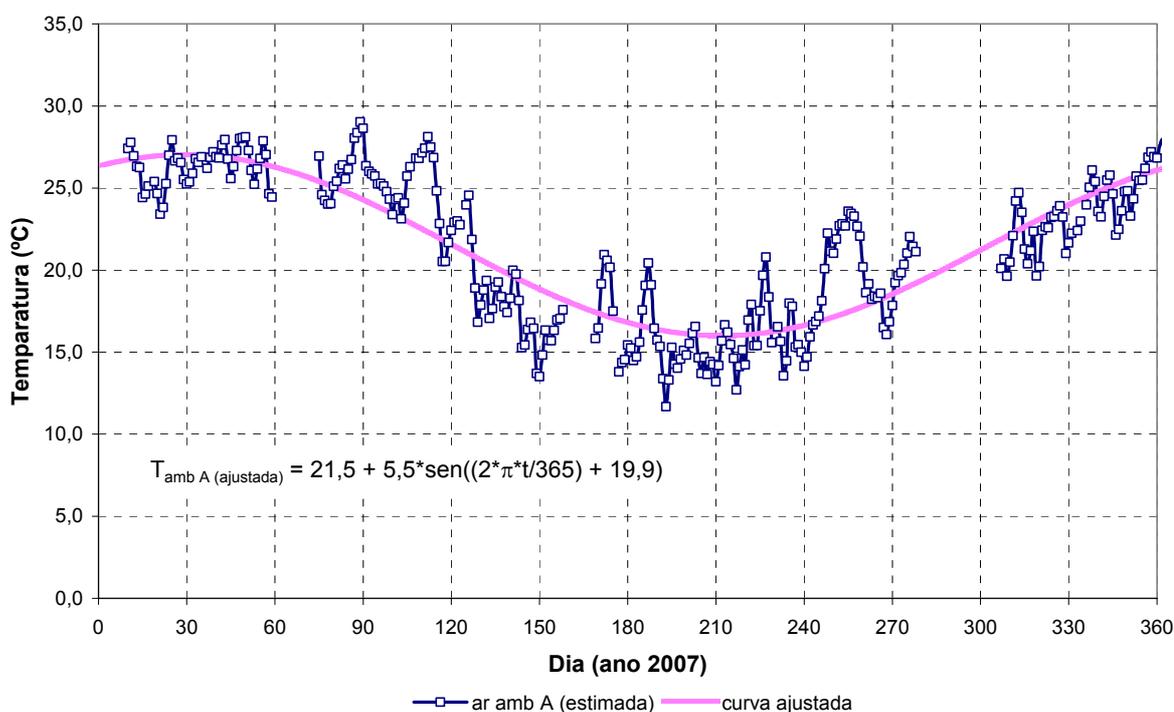


Figura 77: Temperatura estimada do ar no ambiente A

A figura 78 compara a variação desta temperatura estimada, para o ambiente A, com a variação de temperatura monitorada no próprio ambiente A (sensor ST-108/29) e com a variação de temperatura monitorada no ambiente B (sensor ST-109/35).

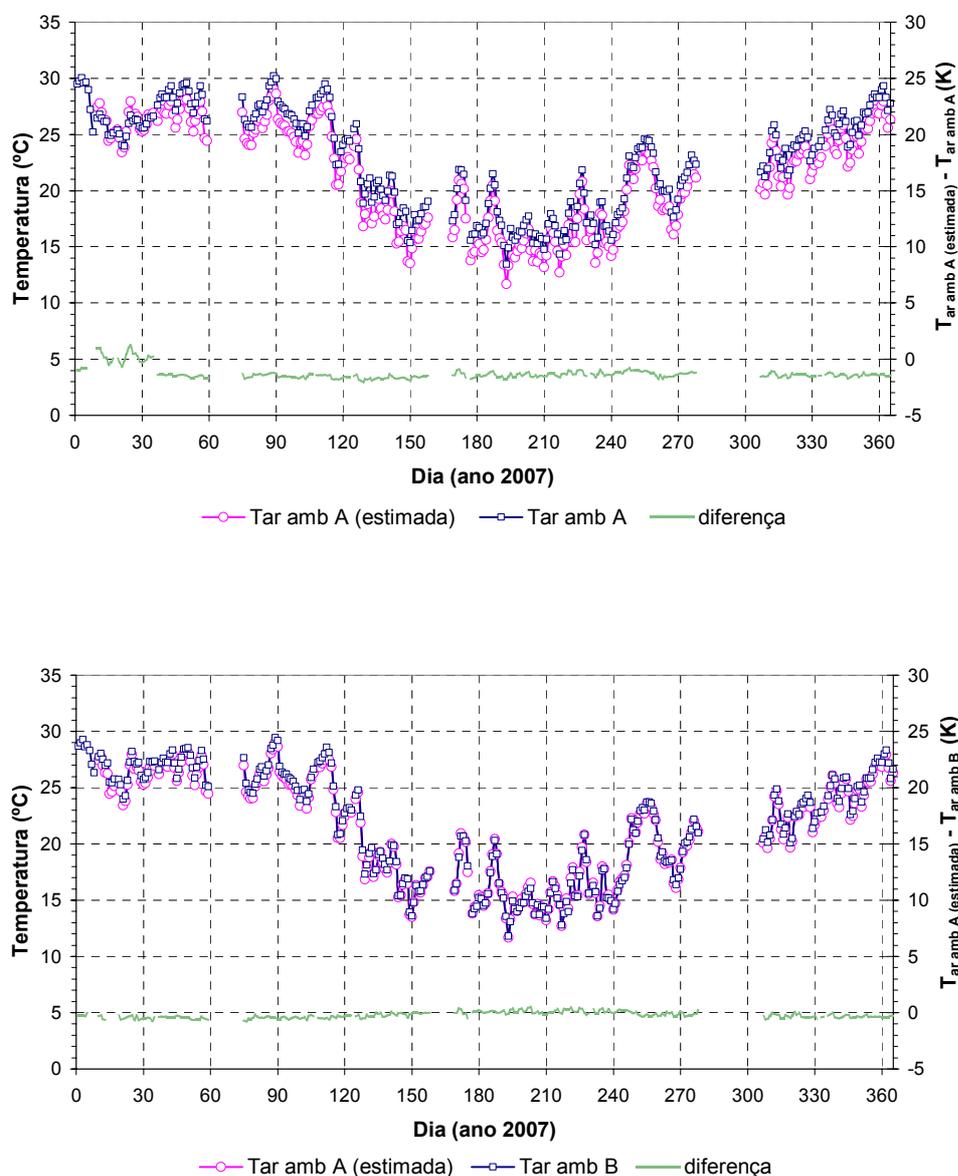


Figura 78: Comparações com a temperatura estimada para o ambiente A

Observa-se, no primeiro gráfico da figura 78, que a temperatura estimada para o ambiente A, como seria de se esperar, ficou acima da temperatura monitorada apenas no período em que o ar circulou no *fan-coil*, o qual resfriou o ar, sobrepondo-se ao efeito do calor dissipado pelo motor do ventilador e diminuindo as temperaturas registradas no ambiente, entre 8 de janeiro

e 4 de fevereiro. No resto do ano de 2007, a temperatura estimada, coerentemente, esteve abaixo da temperatura monitorada, já que os registros de temperatura do ar estavam afetados pela influência da dissipação de calor do motor do ventilador do *fan-coil*. O segundo gráfico da figura 78, por sua vez, mostra a temperatura estimada para o ar do ambiente A muito próxima da temperatura do ar monitorada no ambiente B. Isto também é coerente, pois a temperatura estimada para o ambiente A foi estabelecida para a condição deste ambiente não ter sofrido renovação de ar e não ter o ar circulado pelo *fan-coil*, o que coincide com a condição do ambiente B, no estudo.

As análises acima mostram que os comportamentos térmicos dos ambientes A e B foram muito próximos, no estudo, o que se justifica plenamente pelos procedimentos adotados na pesquisa. A questão que se coloca é que o ar do ambiente A foi constantemente renovado com ar externo, circulado no duto enterrado e, também, circulado no *fan-coil*, na proporção de uma vez e meia o volume do ambiente, por hora, e o ar do ambiente B não foi renovado; ou seja, o ambiente foi mantido fechado durante o estudo.

A renovação do ar, feita no ambiente A, foi equivalente a uma ventilação natural do ambiente e foi proposta, no experimento, para cumprir com a exigência mínima de higiene deste ar, quando da utilização do ambiente. O ar do ambiente B, por sua vez, foi mantido na condição natural, como referência no estudo, e permitiu as comparações feitas acima. Entretanto, se os ambientes tivessem sido testados e monitorados para a condição de uso, com geração interna de calor, o ambiente A teria, naturalmente, uma resposta mais adequada que o ambiente B, tanto em termos de temperatura, como de higiene do ar.

5.7 TEMPERATURAS PREVISTAS PARA O SOLO DE VIAMÃO

O conhecimento da variação de temperatura no solo do local do experimento, em Viamão, foi uma questão que se colocou na pesquisa desde seu início, dado que dela dependia qualquer avaliação sobre o uso deste solo para trocas térmicas com o ar ambiente circulado em dutos enterrados. Na sequência do texto se descreve o uso da equação da difusão do calor no solo, equação (3.37), ajustada aos parâmetros discutidos anteriormente, neste capítulo, com a finalidade de traçar perfis típicos da variação anual de temperatura neste solo. Neste ajuste foram admitidas as simplificações e os procedimentos usados por Moreland (1976), no estudo sobre edificações cobertas por terra, apud Givoni e Kats (1985), aplicáveis quando a

temperatura na superfície do solo for conhecida. Neste estudo, a equação do calor é proposta na forma a seguir:

$$T(z, t) = T_{\text{med}} + \theta_{z=0,05} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z} \left[\text{sen} \left(\left(\omega \cdot (t - D) - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha}} \cdot z \right) \right) \right] \quad (5.16)$$

onde, T_{med} é a temperatura média anual do solo (°C); $\theta_{z=0,05}$, a amplitude da variação de temperatura para a profundidade de 0,05 m (K); D , o número de dias para que a temperatura na superfície do solo, primeiramente, iguale-se a T_{med} .

A figura 48 mostra as variações anuais de temperatura, no solo de Viamão, monitoradas na pesquisa. Como referido antes, foram acompanhadas as temperaturas em 6 profundidades: 0,05 m; 0,30 m; 0,50 m; 1,00 m; 2,00 m e 3,00 m. A temperatura média anual do solo foi admitida igual ao valor médio das temperaturas médias nestas profundidades, ou seja, 19,8 °C. A amplitude da variação de temperatura correspondente à profundidade de 0,05 m foi 6,3K e o parâmetro D foi avaliado em -65 dias, tendo como referência, e incluindo, o primeiro dia do ano de 2007.

Assim, a equação (5.16) foi reorganizada, de forma a representar a variação anual de temperaturas, no solo de Viamão, em função da profundidade e do tempo, como mostra a equação (5.17):

$$T(z, t) = 19,8 + 6,3 \cdot e^{-0,39 \cdot z} \cdot \text{sen} \left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot (t + 65) - 0,39 \cdot z \right) \quad (5.17)$$

onde, $T(z, t)$ é o campo de temperaturas no solo (°C); z , a profundidade (m); t , o tempo, em dias, tendo por referência, e incluindo, o dia 1° de janeiro.

Com base no ano de 2007, a previsão é que a temperatura, na superfície do solo de Viamão ($z = 0$), apresente variação média anual entre 13,5 °C e 26,1 °C e estes eventos, mínimos e máximos, têm previsão de ocorrência, respectivamente, em 28 de julho e 26 de janeiro. O valor médio da distribuição de temperatura na superfície, ou seja, a temperatura de 19,8 °C deve ocorrer em 27 de abril e se repetir em 27 de outubro. A figura 79 apresenta o perfil de temperaturas no solo de Viamão, para as datas referidas acima.

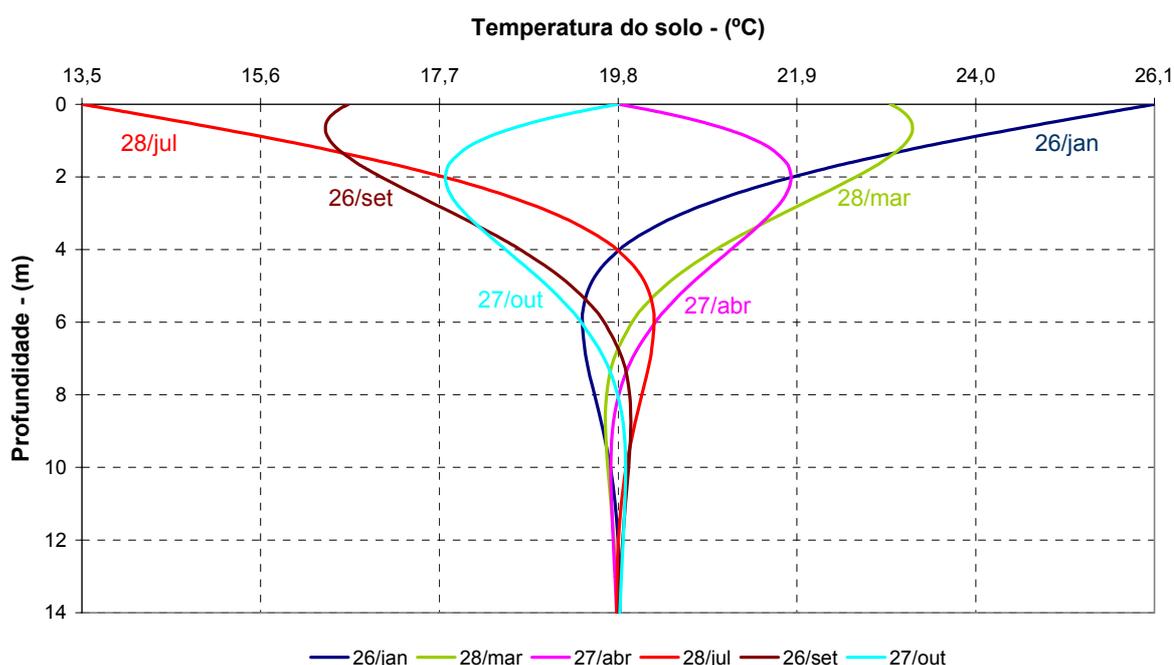


Figura 79: Variação de temperatura no solo de Viamão

A figura 79 mostra, também, o amortecimento da amplitude de variação da temperatura no solo, com a profundidade, bem como, o valor constante desta temperatura, para as camadas mais profundas. A amplitude, que na superfície chega a 6,3K e, coerentemente com a equação (3.44), não passa de 0,5K, para a profundidade de 6 m, é desprezível para a profundidade de 10 m.

Como ilustração no estudo, a figura 80 compara variações de temperatura do solo previstas pela equação (5.17), já apresentadas na figura 79, com os dados obtidos na pesquisa. Os dias privilegiados foram 26 de janeiro e 28 de julho de 2007, e as profundidades foram aquelas monitoradas na pesquisa: 0,05 m; 0,30 m; 0,50 m; 1,00 m; 2,00 m e 3,00 m. Os valores teóricos e experimentais se mostraram bem próximos.

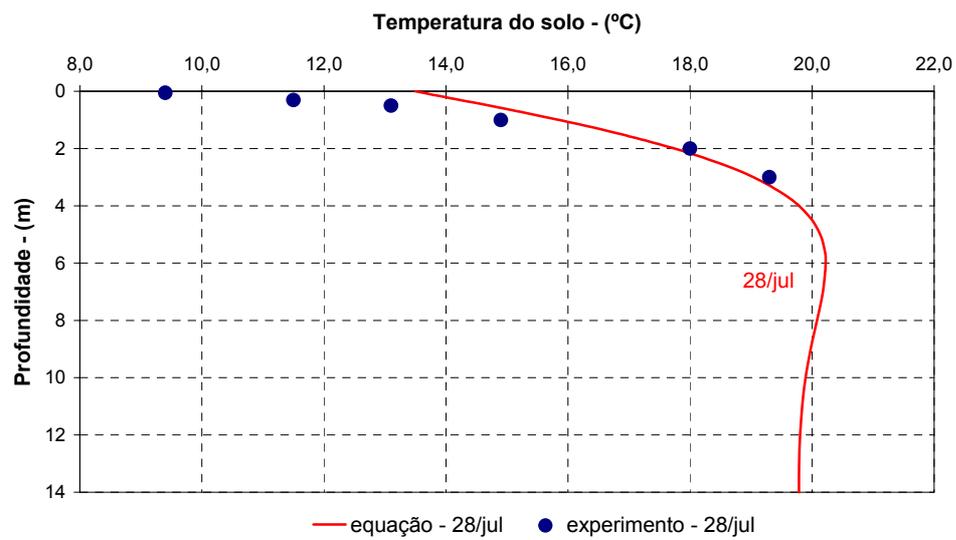
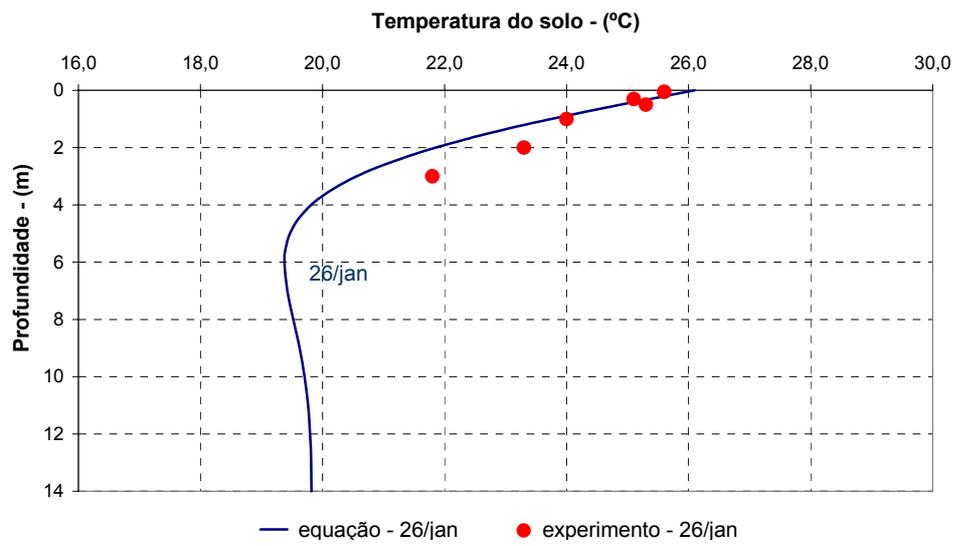


Figura 80: Temperaturas do solo - valores teóricos x valores experimentais

6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Os trocadores de calor solo-ar, neste estudo, são dutos de PVC enterrados no solo, como antes explicado, interligando o ambiente externo a dois ambientes internos da Casa Ventura (ambientes A e B). Relembrando, o ar aspirado por um ventilador, posicionado na área do bambuzal, foi insuflado em três destes dutos (dutos A, B e C), com o propósito de fazer o ar trocar calor com o solo, para depois ser injetado nos ambientes. O ar em escoamento nos dutos foi monitorado, quanto à variação de temperatura e umidade.

O duto A, enterrado na profundidade de 1,60 m, foi proposto para levar o ar para o Ambiente A; o duto B, também enterrado na profundidade de 1,60 m e afastado do duto A por 0,60 m, foi proposto para levar o ar para o ambiente B; e o duto C, enterrado na profundidade de 0,50 m, foi proposto para levar ar para o ambiente A, da mesma forma que o duto A.

O que se propõe, neste capítulo, é prever valores, através da simulação numérica, para a temperatura do ar em escoamento nos dutos enterrados (trocadores de calor solo-ar) e do solo, no entorno deles. E, com estes resultados preditos, realizar comparações com os resultados obtidos do monitoramento experimental.

6.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL

O domínio computacional, construído para possibilitar a simulação numérica, foi desenvolvido no *software* GAMBIT, como já referido no sub-capítulo 3.3. A proposta foi, dentro do possível, reproduzir computacionalmente o que se construiu no experimento. As figuras 8, 32 e 33 permitem visualizar, tanto a posição, como a geometria e dimensão de todos os componentes que integram ou se relacionam ao domínio construído, que são: a Casa Ventura; os ambientes A e B; a área do bambuzal; o ventilador; os dutos enterrados A, B e C; e o próprio solo.

O domínio computacional abrangeu um corte no terreno, com volume aproximado de 14.500 m³, configurando uma superfície, ao nível do terreno, com uma área de 900 m², a qual foi modelada de forma a reproduzir os declives, aclives e planos existentes. Esta superfície do terreno, cuidadosamente definida, serviu como referência para a inserção dos dutos na modelagem computacional, ou seja, foi referência para a definição e detalhamento do traçado longitudinal complexo dos dutos, no domínio computacional. Relembrando, os dutos A e B possuem um diâmetro nominal de 110 mm e o duto C, de 100 mm.

A figura 81 mostra o solo modelado, onde estão marcadas as posições de entrada e saída dos dutos no terreno. A figura 82, por sua vez, mostra o traçado dos dutos.

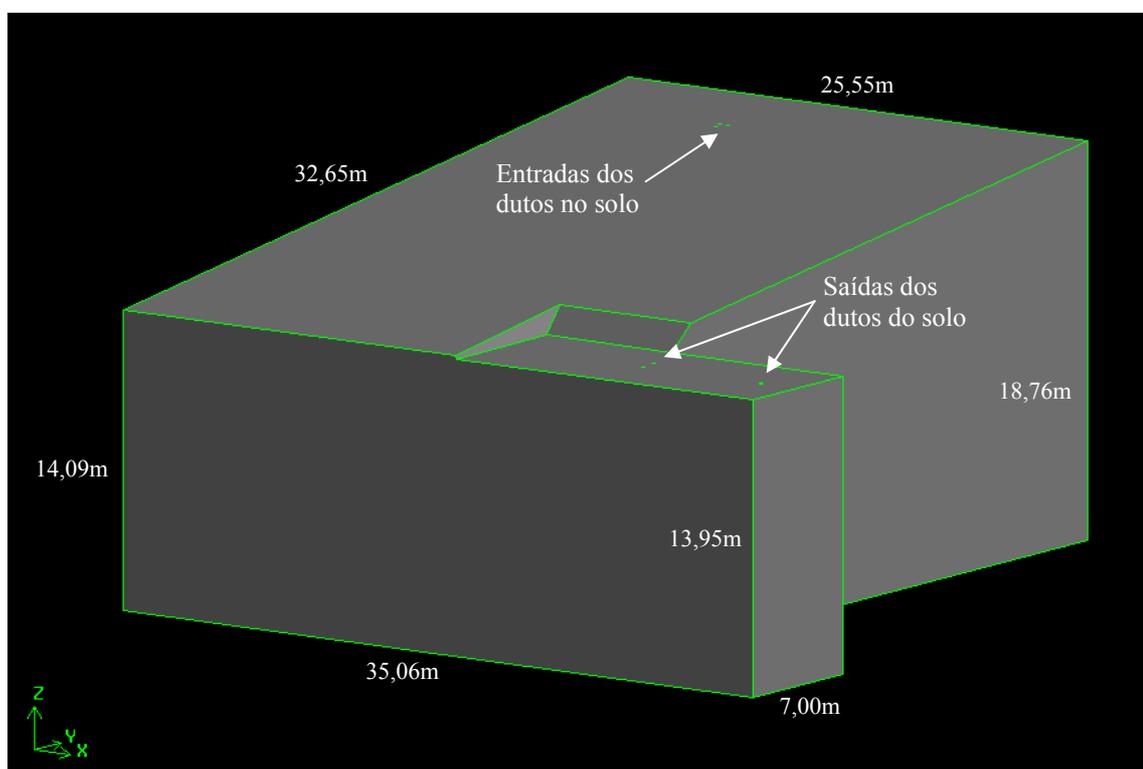


Figura 81: Domínio computacional

Considerando a necessidade de adequar o esforço computacional, frente ao equipamento e *softwares* disponíveis, o modelo foi simplificado, em relação à geometria real dos trocadores de calor solo-ar; ou seja, na modelagem não foi considerada a espessura das paredes dos

dutos¹⁶. Isto, porque a diferença na ordem de grandeza das dimensões envolvidas, a complexidade da geometria dos dutos e o grau de refinamento necessário tornaram inviável gerar uma malha, no GAMBIT, que fosse possível de ser exportada para o FLUENT, o qual foi o *software* usado, para as etapas seguintes da análise computacional.

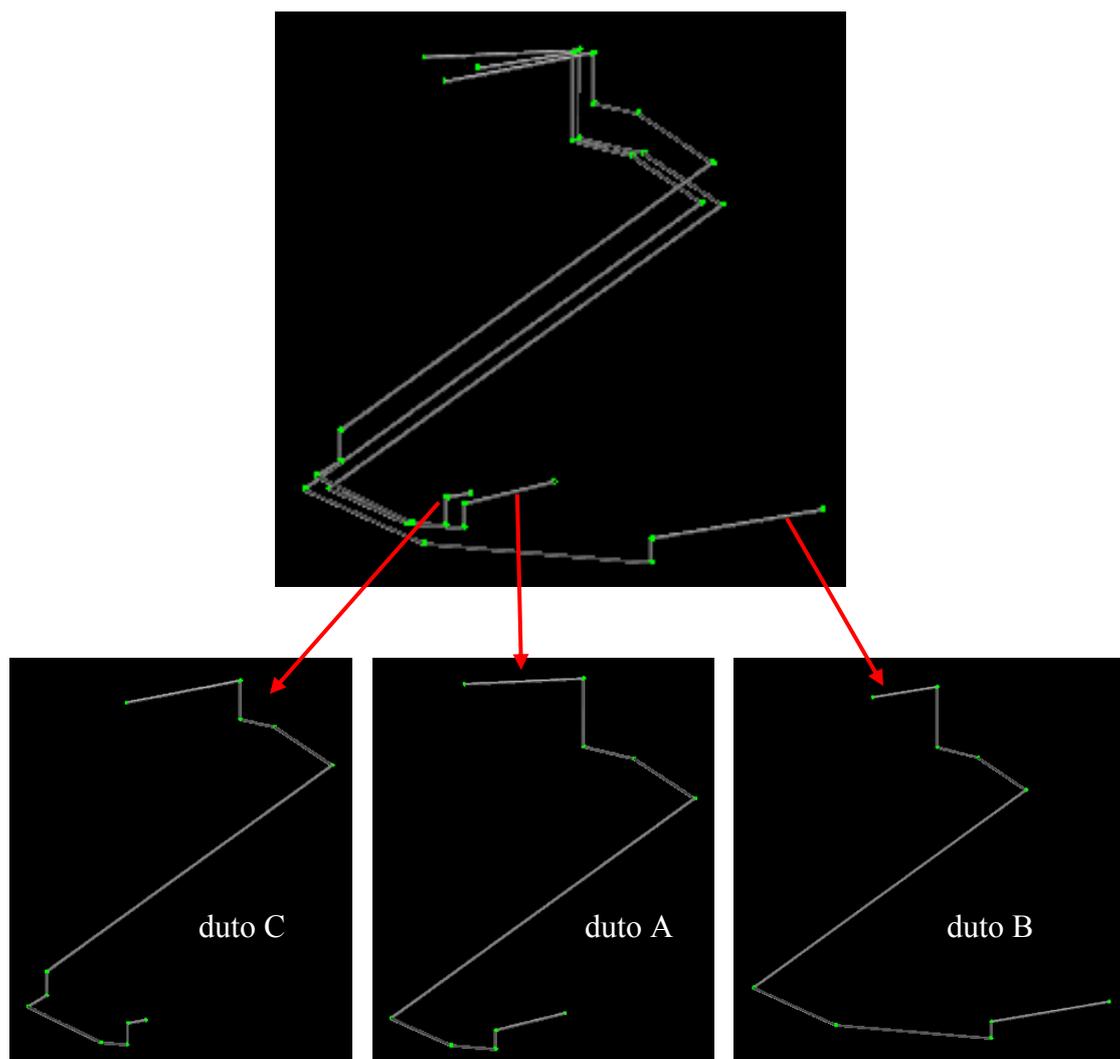


Figura 82: Traçado dos dutos

Admitida a simplificação referida anteriormente, a seguir, no texto, descreve-se como o problema foi continuado. Ainda no GAMBIT, foram gerados no interior do domínio pré-definido para o solo os três volumes correspondentes aos dutos, obedecendo aos eixos longitudinais e diâmetros correspondentes, conforme mostra a figura 83. Foi necessário

¹⁶ Paralelamente a este estudo, usando um domínio computacional mais simples, foram simulados modelos com e sem a parede do duto e os resultados não mudaram significativamente.

identificar e definir o tipo (*fluid* ou *solid*) de cada material. Foram identificados, no *software*, quatro volumes: um para o solo e um para cada um dos dutos A, B e C. O volume correspondente ao solo foi identificado com o tipo *solid*, para ser associado às propriedades do solo, e os volumes correspondentes aos dutos foram identificados com o tipo *fluid*, para serem associados às propriedades do ar em escoamento através deles.

Desta forma, no modelo, foi admitido o ar escoando por furos feitos no solo, em contato direto com o mesmo. A interação entre o ar e o solo foi garantida, admitindo-se faces comuns entre os volumes correspondentes. As superfícies externas dos volumes de ar e as superfícies internas dos furos no solo foram devidamente conectadas, assegurando a ocorrência dos fenômenos termodinâmicos entre o solo e ar. A figura 83 ilustra a disposição relativa dos quatro volumes.

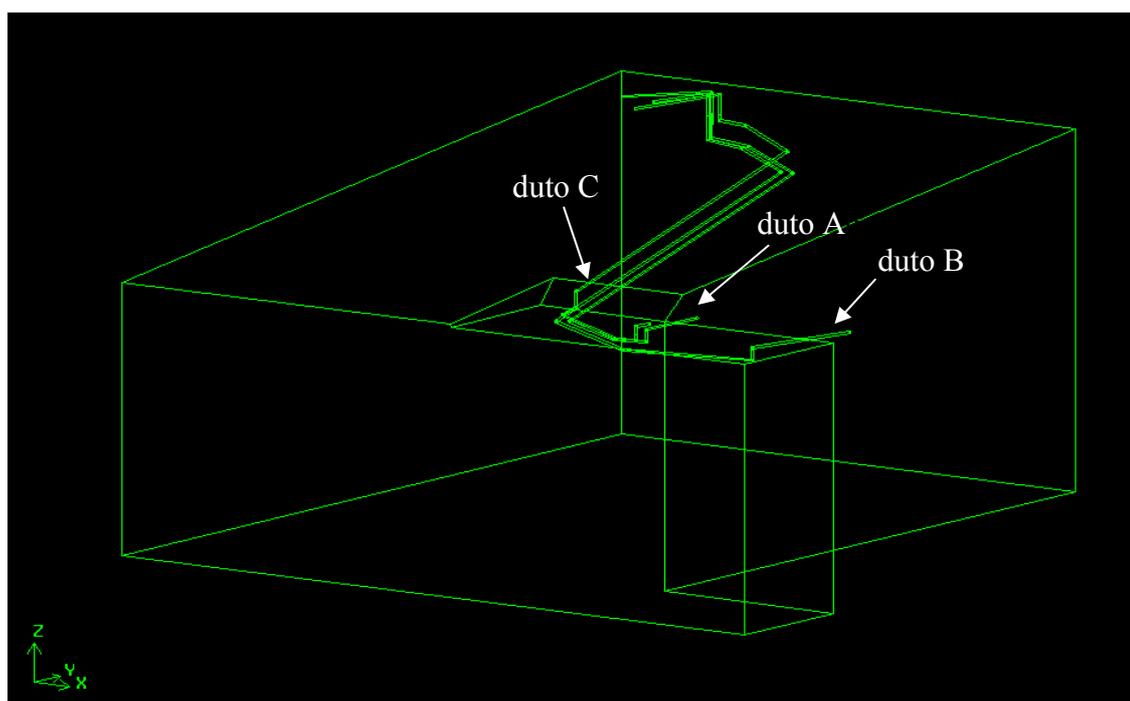


Figura 83: Representação esquemática do conjunto solo e dutos

Para a discretização do modelo, foram usados volumes finitos tetraédricos. A malha independente, usada nas simulações, dividiu o solo em 2.790.078 volumes finitos e o ar circulante nos dutos A, B e C, em 69.323, 80.185 e 57.570 volumes finitos, respectivamente. A figura 84 mostra a malha deste domínio computacional, com um total de 2.997.156 volumes tetraédricos, na qual é possível observar o refinamento nas regiões correspondentes aos dutos, ou seja, nas regiões de escoamento do ar.

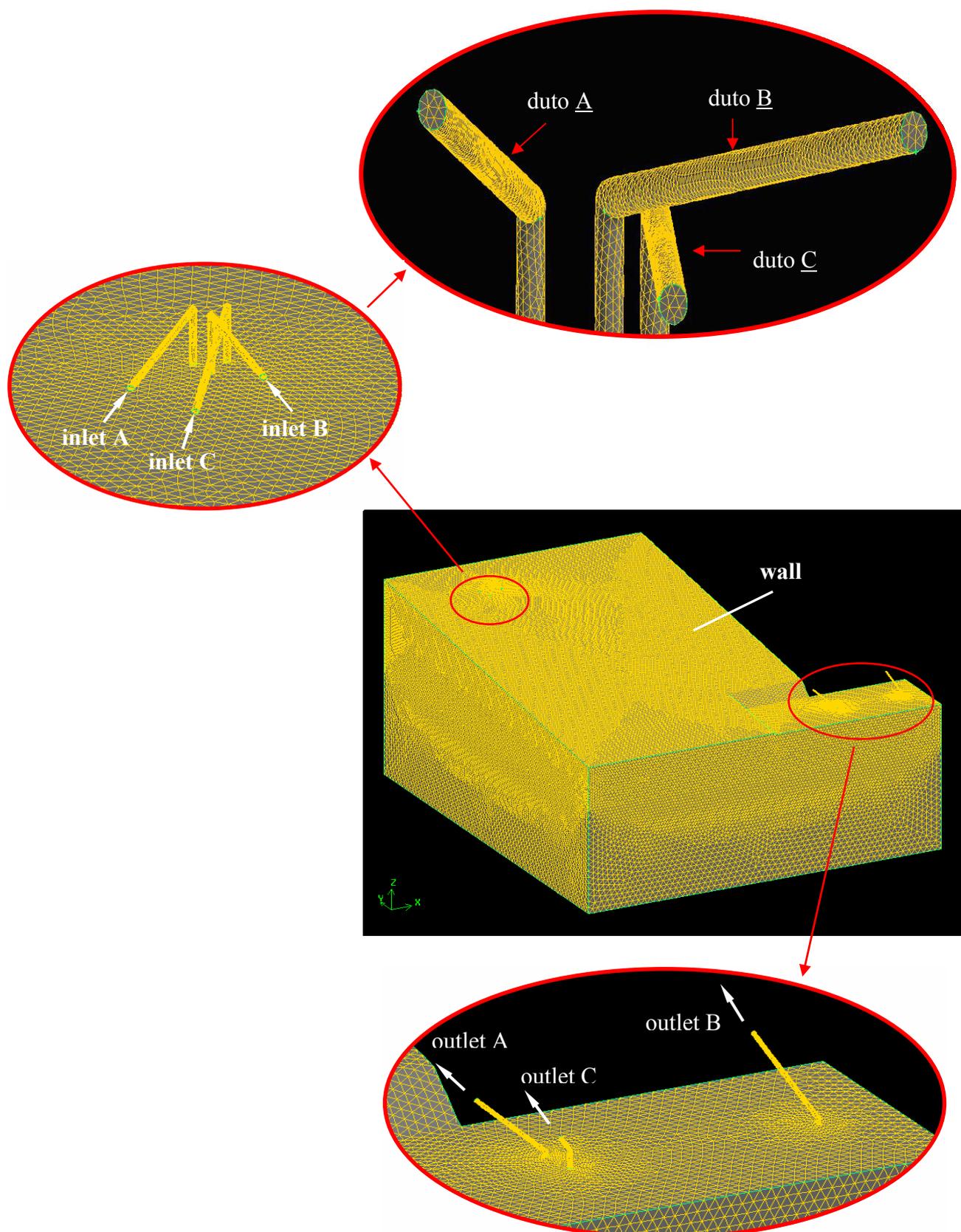


Figura 84: Malha e identificação das condições de contorno

Cabe destacar que, a independência da malha foi definida, com a precisão de 10^{-3} , comparando-se a temperatura do ar em escoamento no duto A, em um ponto localizado a 11m da entrada do duto. Das três malhas testadas, que foram exportadas para o FLUENT, para processamento, seguindo os passos descritos a seguir, a escolhida foi a malha referida anteriormente, com menor número de volumes finitos.

Retomando a sequência da etapa de pré-processamento, ainda no GAMBIT, foi identificado e definido o tipo das condições de contorno (*velocity*, *pressure* ou *wall*), as quais são definições necessárias à inserção destas condições de contorno e das condições iniciais do problema, quando do uso do *software* FLUENT.

Foi identificada e definida como *wall* a condição de contorno correspondente à variação térmica na superfície do terreno. Outras três condições de contorno foram identificadas e definidas como *velocity inlet*, correspondentes às condições do ar na entrada dos dutos, e por fim, mais três condições de contorno foram identificadas e definidas como *pressure outlet*, correspondentes às condições do ar na saída dos dutos. A figura 84 ilustra, também, esta identificação das condições de contorno.

Com a geração da malha, terminou a etapa de pré-processamento no *software* GAMBIT e esta foi, então, exportada para *software* FLUENT, para complementação do pré-processamento e solução do problema. Nesta complementação foram informadas ao *software* as propriedades dos materiais, as condições de contorno e as condições iniciais do problema.

Como já indicado no GAMBIT, o modelo para análise do trocador de calor solo-ar é composto de dois materiais: o solo e o ar em escoamento nos furos feitos no solo. Continuando a etapa de pré-processamento, no FLUENT, as propriedades destes materiais foram informadas ao *software*. Para o ar, identificado como *fluid*, e para o solo, identificado como *solid*, os valores definidos estão na tabela 12.

Tabela 12: Propriedades dos componentes construtivos dos dutos enterrado

Componente		ρ (kg/m^3)	κ (W/mK)	c_p (J/kgK)	μ (kg/ms)
1	Ar (nos dutos)	1,16	0,0242	1.010	$1,7894 \times 10^{-5}$
2	Solo*	1.800	2,1	1.780	-

* valores obtidos em estudos paralelos na pesquisa – ver sub-capítulos: 4.5; 5.1; 5.2 e 5.3.

No FLUENT, as condições de contorno podem ser inseridas, ou como valores constantes, ou como valores dependentes do tempo, segundo funções definidas pelo usuário. No primeiro caso, as informações são diretas; isto é, identificada no FLUENT a condição de contorno, uma por vez, o valor constante é inserido diretamente. No segundo caso, é necessário criar UDFs - *user defined functions*, ou seja, é necessário gerar um arquivo, com as **funções definidas pelo usuário** para as variações no tempo, uma para cada condição de contorno, o qual deverá ser incluído no FLUENT. Neste caso, compilado o arquivo, no FLUENT, a inserção das informações segue a lógica do primeiro caso, só que, ao invés do valor constante, é informada a UDF correspondente.

Neste estudo foram definidas funções de periodicidade anual, para variações de temperatura do solo, em sua superfície, e do ar, na entrada dos dutos. Estas funções foram obtidas de curvas ajustadas estatisticamente¹⁷ aos correspondentes registros experimentais, na pesquisa. A figura 85 mostra a UDF, a qual foi inserida no FLUENT, como condição de contorno, para a variação da temperatura na superfície do solo.

```

/*      This UDF file creates a time dependent boundary condition for temperature*/
/*      I used it to include time dependent temperature boundary condition (T(t))*/
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(BC_ground, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;
    real T0 = 291.70;
    real theta = 6.28;
    real omega = 199.24e-9;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) = T0 + theta*sin((omega*t)+(26.24));
    }
    end_f_loop(f, thread)
};

```

Figura 85: UDF da variação de temperatura na superfície do solo

As condições de contorno, do problema em estudo, foram, então, inseridas no FLUENT, como indicado a seguir:

- identificada a condição de contorno *velocity inlet*, para cada duto, foram inseridas as condições do ar ao entrar neste duto, que foram: o valor médio da velocidade de escoamento do ar no duto, como definido no sub-capítulo 5.4; e a variação de temperatura

¹⁷ Técnica de regressão não linear, utilizando o método dos mínimos quadrados.

deste ar, inserida a partir de UDF, previamente informada e compilada no FLUENT (ver tabela 14);

- para as condições de contorno relativas à saída do ar nos dutos, definida como *pressure outlet*, foi mantido o padrão do FLUENT, nos três dutos, que corresponde à pressão atmosférica;
- a condição de contorno, relativa à variação térmica na superfície do solo, identificada como *wall*, foi inserida a partir da UDF correspondente, também, previamente informada e compilada no FLUENT (ver figura 85 ou atabela 14).

A tabela 13 apresenta os sensores de interesse nesta análise, cujos registros foram usados para definir as UDFs informadas ao FLUENT, identificando, para cada um, sua posição, função e relação com a variação de temperatura da respectiva condição de contorno (ver figura 32).

Tabela 13. Condições de contorno de temperaturas para os trocadores de calor solo-ar

Sensor	Posição	Registro	Condição de contorno	Relação do registro com a variação de temperatura na respectiva condição de contorno do problema (UDF)
ST 104/7	Subsolo 0,05 m	$T_{\text{solo } 0,05}$	Superfície do solo	A variação de temperatura na superfície do solo foi considerada igual à variação da curva ajustada aos dados de temperatura do solo registrados para a profundidade de 5 cm
ST 111/21	Ventilador	$T_{\text{ar ins}}$	Ar (entrada dos dutos)	A variação de temperatura do ar na entrada dos dutos foi considerada igual à variação da curva ajustada aos dados de temperatura registrados na insuflação do ventilador

A tabela 14 resume as condições de contorno usadas para solução do problema em estudo. É importante salientar que as laterais e o fundo do domínio foram considerados isolados termicamente. Isto por que: lateralmente, o gradiente de temperatura no solo é pequeno e, na pesquisa, foi desconsiderado; e, na profundidade, o domínio computacional foi definido com dimensão mínima de 14 metros, ou seja, profundidade suficiente para o solo não sofrer variações significativas de temperatura, em decorrência da radiação solar incidente em sua superfície (ver sub-capítulo 5.7).

Já como condição inicial do problema, correspondente à hora zero do dia primeiro de janeiro de 2007, foi usada, para todo o domínio, a temperatura média anual do solo, igual a 291,7K.

Foram adotados, ainda, na etapa de processamento do problema: um passo incremental¹⁸ de 3600 s e um máximo de 100 iterações por passo.

Tabela 14: Condições de contorno para os dutos enterrados – ciclo anual

Elemento	Condição de Contorno			
	Tipo	UDF - Temperatura (K)	Velocidade (m/s)	Pressão (Pa)
Superfície do solo	Wall	$T=291,7+6,3*\text{sen}((2*\pi*t/365)+26,2)$	-	-
Ar – duto A (entrada)	Velocity inlet	$T=296,2+6,9*\text{sen}((2*\pi*t/365)+26,4)$	3,3	-
Ar – duto B (entrada)	Velocity inlet	$T=296,2+6,9*\text{sen}((2*\pi*t/365)+26,4)$	3,6	-
Ar – duto C (entrada)	Velocity inlet	$T=296,2+6,9*\text{sen}((2*\pi*t/365)+26,4)$	2,5	-
Ar – duto A (saída)	Pressure outlet	-	-	Atmosférica
Ar – duto B (saída)	Pressure outlet	-	-	Atmosférica
Ar – duto C (saída)	Pressure outlet	-	-	Atmosférica

t = tempo – (dia)

Na etapa de processamento, o FLUENT, então, resolveu o problema em estudo, baseado nas informações anteriores e, como referido no sub-capítulo 3.3, usando a equação da conservação da massa, equação (3.49), a equação da quantidade de movimento, equação (3.50), e a equação da energia, equação (3.52), juntamente com a equação de transporte devido ao escoamento turbulento, equação (3.56), a qual corresponde ao modelo do transporte das tensões de Reynolds – RSM.

Na etapa de pós-processamento, concluindo a modelagem computacional dos trocadores de calor solo-ar, os resultados preditos são apresentados e discutidos, como segue.

¹⁸ O passo incremental, inicialmente adotado pequeno, foi sendo aumentado: 1s, 10s, 100s, 900s, 1800s e 3600s. A definição deu-se pelo tempo de processamento, respeitando a convergência do processo e a precisão dos resultados, sistematicamente verificada, em um caso e no outro sequente, com a exigência 10^{-2} .

6.2 ANÁLISE DOS PERFIS DE TEMPERATURA DO AR NOS TROCADORES DE CALOR SOLO-AR

As variações de temperaturas do ar em escoamento nos trocadores de calor solo-ar, na fase experimental, como referido no item 5.6.4, foram registradas por sensores posicionados ao longo dos dutos. No duto A, foram quatro locais de monitoramento, correspondentes às posições 2 (entrada – $x=0,0$ m), 3 ($x=11,0$ m), 4 ($x=34,0$ m) e 5 (saída – $x=42,0$ m), mostradas na figura 32. Nos dutos B e C, foram três locais de monitoramento; não foi monitorada a temperatura de saída do ar nestes dutos. Na fase de simulação numérica, as coordenadas destes pontos foram informadas ao FLUENT e as variações dos valores preditos do comportamento anual da temperatura, nestas posições, são apresentadas nas figuras 86, 87 e 88, respectivamente. Também, nestas figuras, são mostradas, para comparações, as correspondentes curvas das temperaturas, nestas mesmas posições, as quais foram ajustadas estatisticamente aos valores experimentais, bem como o erro entre estas curvas, tendo por referência os valores medidos.

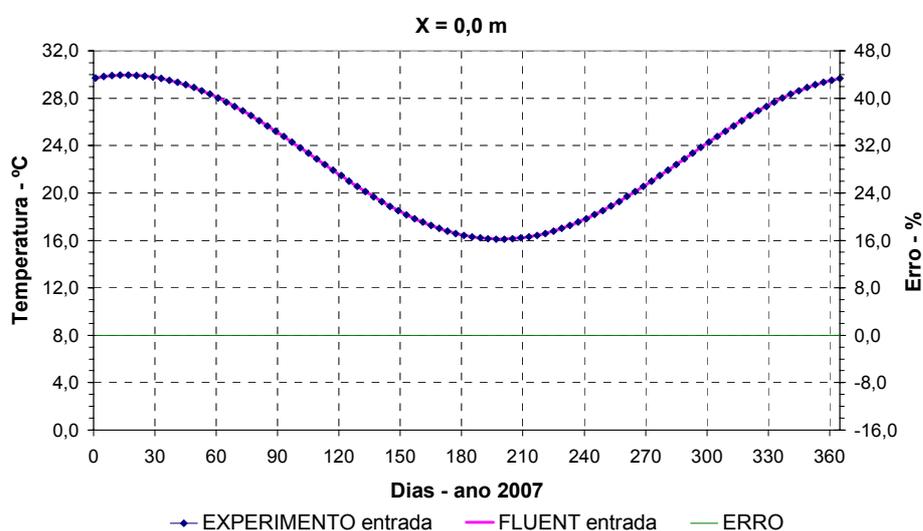


Figura 86 (continua)

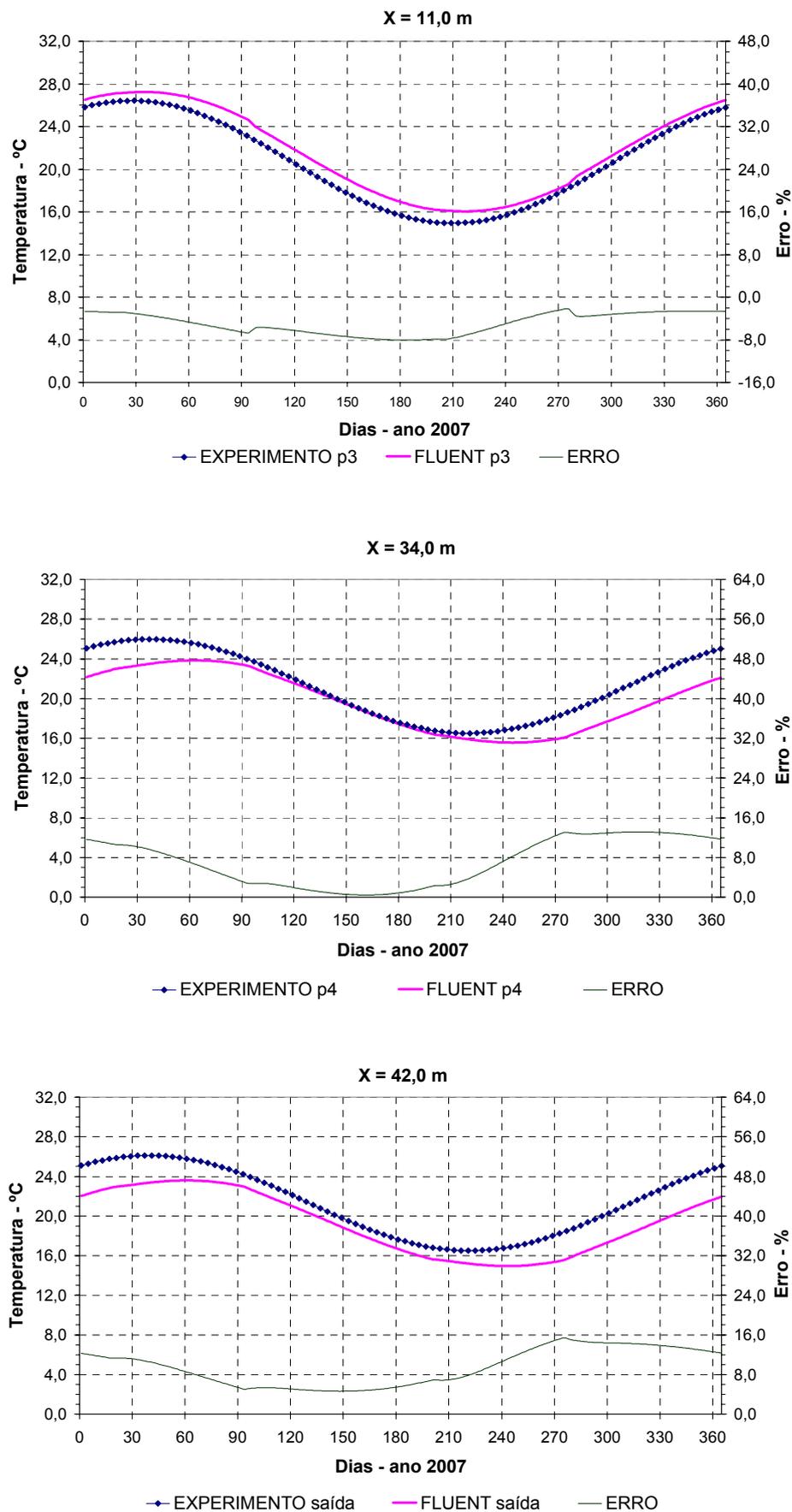


Figura 86: Temperatura do ar em escoamento no duto A – ciclo anual

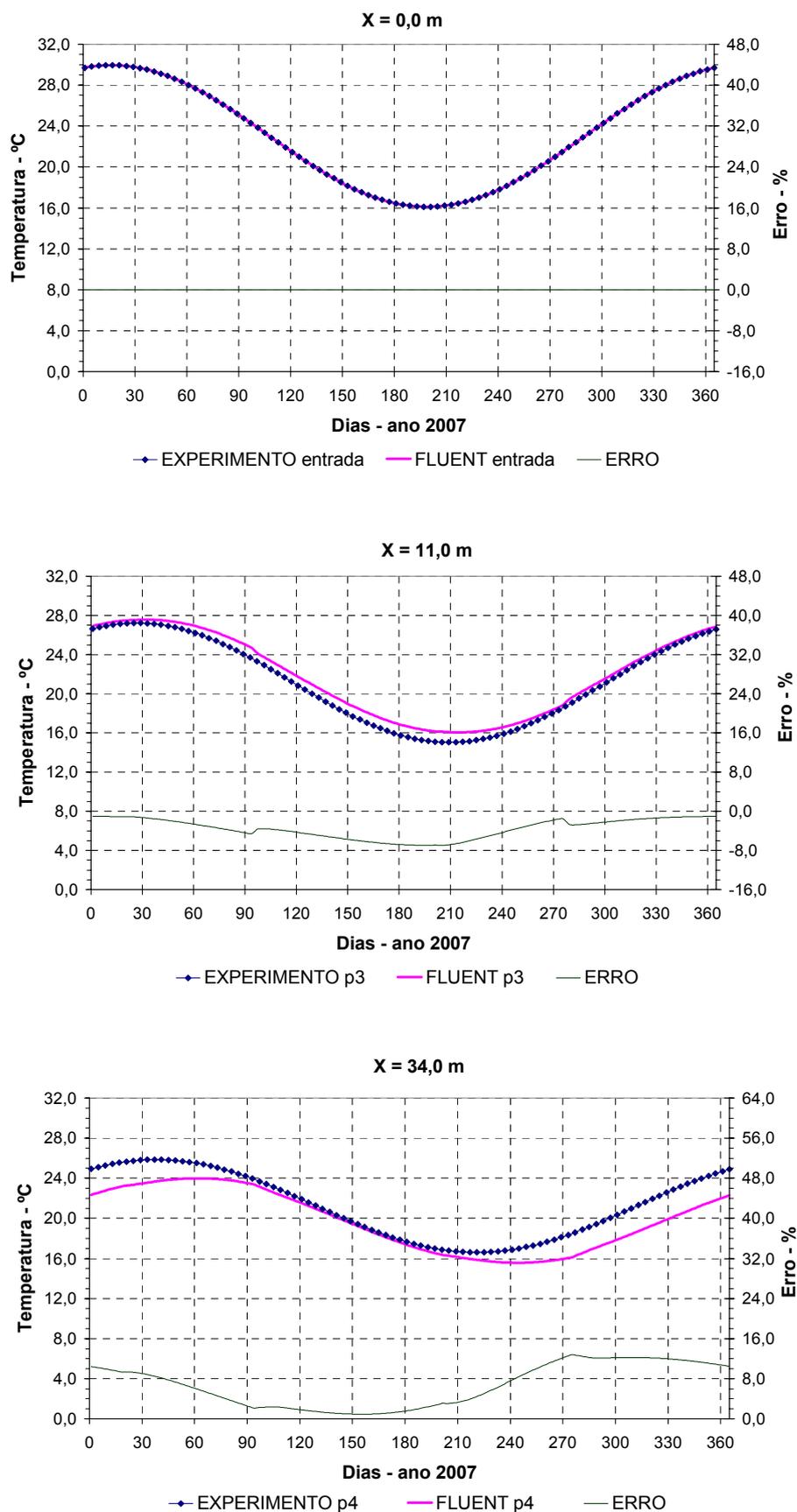


Figura 87: Temperatura do ar em escoamento no duto B – ciclo anual

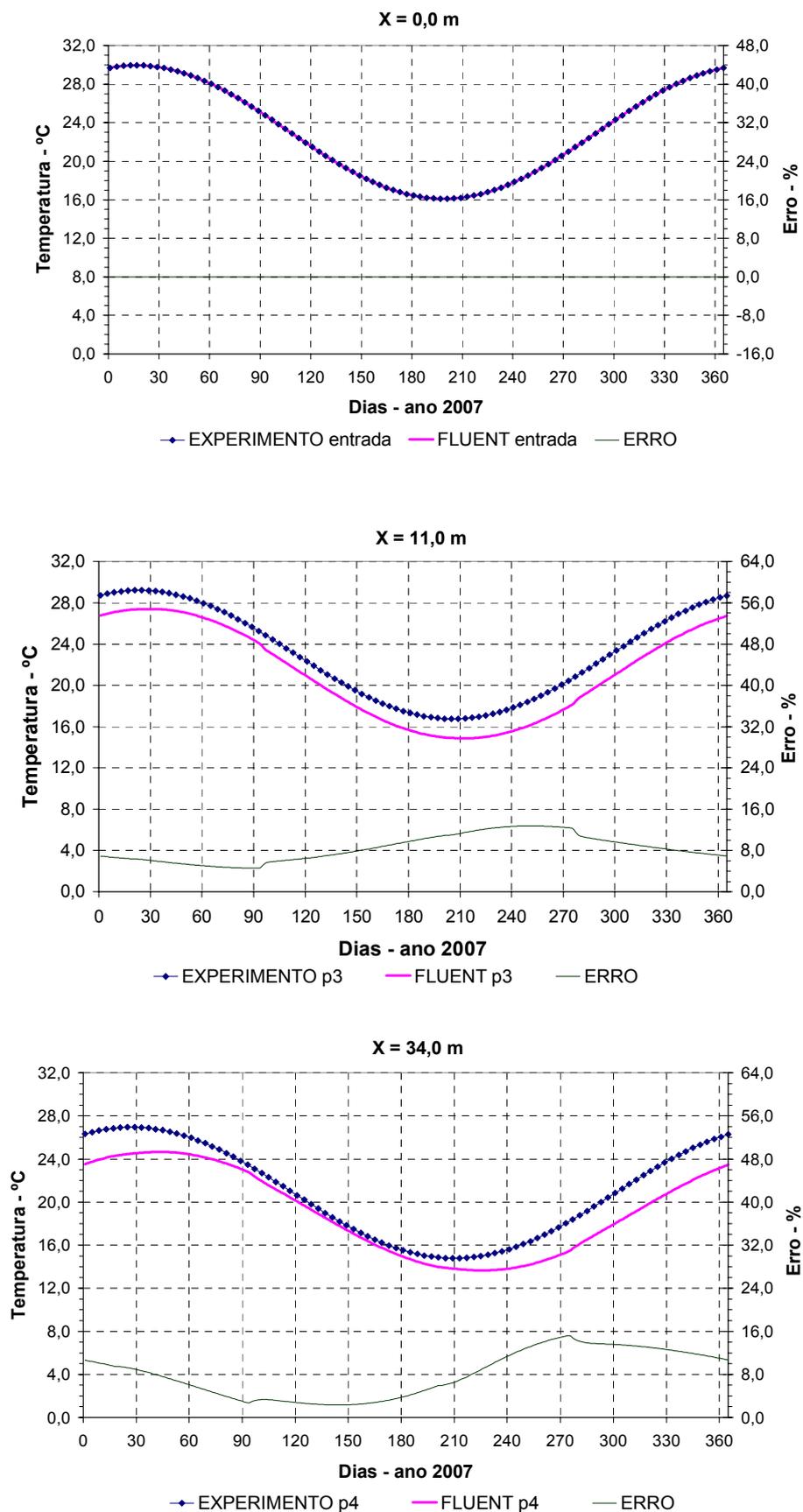


Figura 88: Temperatura do ar em escoamento no duto \underline{C} – ciclo anual

Da observação das curvas apresentadas acima, nas figuras 86, 87 e 88, para os três dutos, considerando a posição de entrada, as curvas obtidas dos dados experimentais e as curvas numéricas previstas pelo FLUENT coincidem; ou seja, as curvas ajustadas aos valores experimentais e informadas ao FLUENT, como condição de contorno (UDFs), foram reproduzidas pelo *software*.

Para as demais posições monitoradas: no duto A, o erro¹⁹ máximo, em valor absoluto, entre as curvas foi de 8,1 %, na posição 3; de 13,2 %, na posição 4; atingindo valor de 15,4 %, na posição de saída do ar do duto. Para os dutos B e C não foram feitos registros de temperaturas nas saídas do ar dos dutos. Para a posição 3, neste dutos, os erros foram 7,0 % e 12,8 %, respectivamente. Já, para a posição 4, os erros foram 12,8 % e 15,2 %, respectivamente.

Como forma de avaliar uma tendência, na figura 89, apresenta-se a diferença, entre o valor máximo e o valor mínimo do erro, em cada ponto monitorado e para cada duto. A diferença cresceu com o comprimento do duto. No duto A, entre as posições 3 e 4, o crescimento médio foi de 0,30 %, por metro de duto.

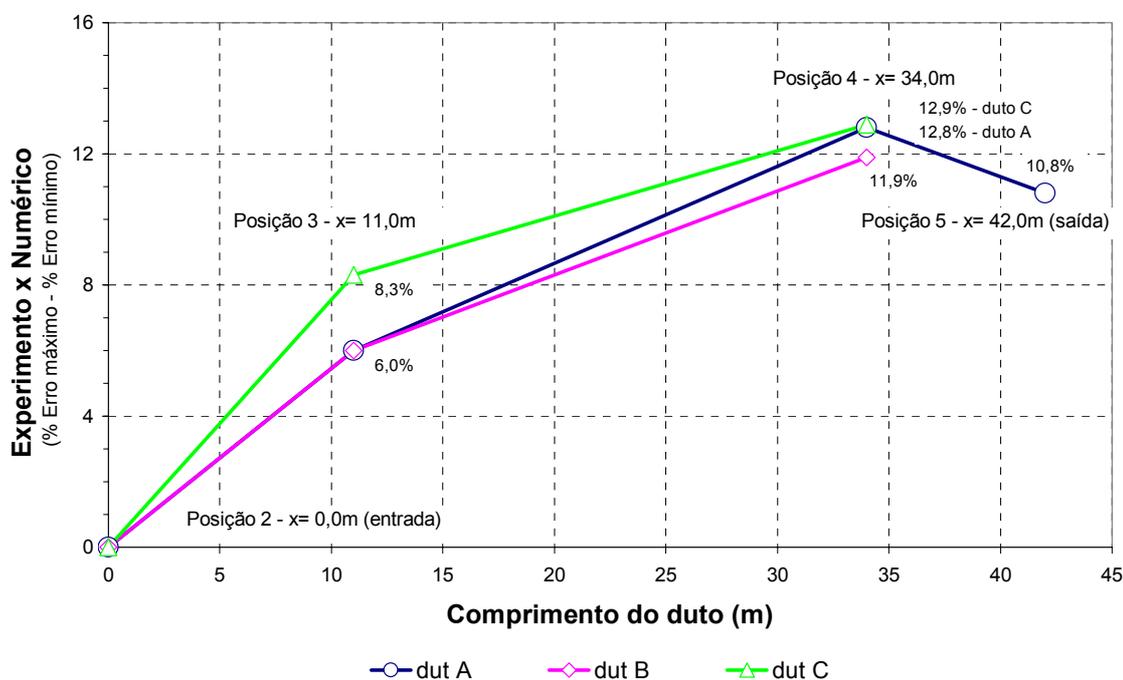


Figura 89: Erro - curva experimental x curva numérica

¹⁹ O erro, entre os valores experimentais e os valores previstos, foi avaliado tendo por referência os valores experimentais.

A variação percentual mais acentuada entre as curvas no trecho de entrada do ar nos dutos, entre a posição 2 e a posição 3 de monitoramento, pode ser atribuída à simplificação do modelo computacional, no que se refere à transição dos dutos enterrados até o ventilador, na superfície do solo. Como descrito antes, os dutos enterrados afloram à superfície do terreno, na região do bambuzal e são ligados ao bocal de insuflação do ventilador por dutos flexíveis (aéreos e curvos), protegidos da radiação solar direta (ver figura 24). No modelo, isto foi simplificado: os dutos foram admitidos sempre com as mesmas características físicas e com trechos retos.

Esta variação percentual mais acentuada também aconteceu no trecho de saída do ar do duto A, como mostra a figura 89. Neste caso, após a posição 4 de monitoramento, o duto enterrado passa por uma região do solo em talude, diminuído abruptamente sua profundidade. Após, ao entrar no ambiente A, pelo piso, o duto se constitui por um trecho horizontal, flexível, paralelo ao piso e aéreo (ver figura 18). Da mesma forma que no caso anterior, isto também foi simplificado no modelo, sendo o duto admitido sempre com as mesmas características físicas.

Entre as posições de monitoramento 3 e 4, a profundidade dos dutos se mantém praticamente constante, os dutos A e B, na profundidade de 1,60 m, e o duto C, na profundidade de 0,5 m, o que facilitou a modelagem.

Outro aspecto a ser considerado são as propriedades termo físicas do solo, consideradas constantes e independentes da profundidade. A difusividade térmica do solo, por exemplo, foi determinada e admitida constante, como antes descrito, a partir de séries históricas de temperatura do solo, registradas até 0,5 m de profundidade. A massa específica e a umidade do solo foram determinadas em laboratório e consideradas constantes, o que é uma simplificação do comportamento real do solo.

As considerações acima estão no sentido de contextualizar as diferenças observadas, entre os resultados experimentais e os produzidos pelo FLUENT, nos casos analisados, as quais foram pequenas (inferiores a 15%) e confirmam a viabilidade das análises realizadas e de ser possível utilizar este *software* para predizer o comportamento térmico dos trocadores de calor solo-ar. Na continuidade dos estudos, em trabalhos futuros, estas considerações poderão ser aprofundadas.

6.2.1 Ilustração típica de um dia de verão

O *software* FLUENT disponibiliza, em escala de cores, a visualização da distribuição de temperatura no solo e, também, do ar em escoamento nos dutos, ampliando as possibilidades de análise.

A figura 90 e a figura 91 ilustram isto, para o passo incremental 9000 da análise, correspondente ao dia 10 de janeiro. É importante destacar que os perfis de temperatura apresentados correspondem a valores médios diários, obtidos de condições de contorno, também admitidas com valores médios diários (ciclo anual).

A figura 90 mostra dois planos virtuais, criados no domínio de estudo, para possibilitar a visualização dos perfis de temperatura no solo, perfis estes que são destacados na figura 91. Os planos foram concebidos verticais, perpendiculares à lateral dos dutos enterrados e passando pelas posições 3 e 4 de monitoramento.

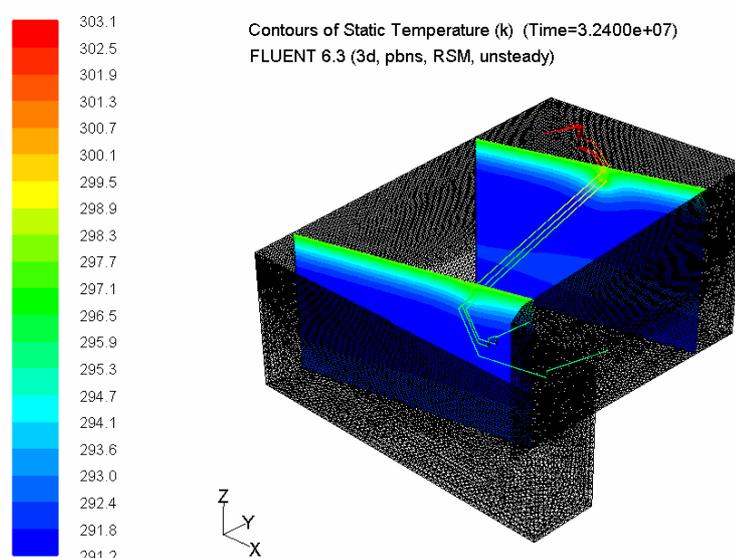


Figura 90: Perfis de temperatura do solo – dia de verão → identificação dos planos

É possível observar, na figura 90, o traçado dos dutos, bem como, pela mudança de cor, a variação de temperatura ao longo do seu comprimento. A temperatura de entrada do ar no

duto, em torno dos 303 K, confirma a condição de contorno, definida na tabela 14, para o dia 10 de janeiro de 2007. Ao passar pelo solo, ao longo do comprimento do duto, o ar diminui e estabiliza sua temperatura, próximo à temperatura do solo.

Os perfis de temperatura do solo, das figuras 90 e 91, são coerentes com um período quente, de verão. Na superfície do solo, a temperatura chega próximo aos 298 K, valor que confirma a condição de contorno, dada na tabela 14. Para as camadas mais inferiores do solo, a temperatura vai diminuindo, tendendo para o valor médio da distribuição, em torno dos 292 K.

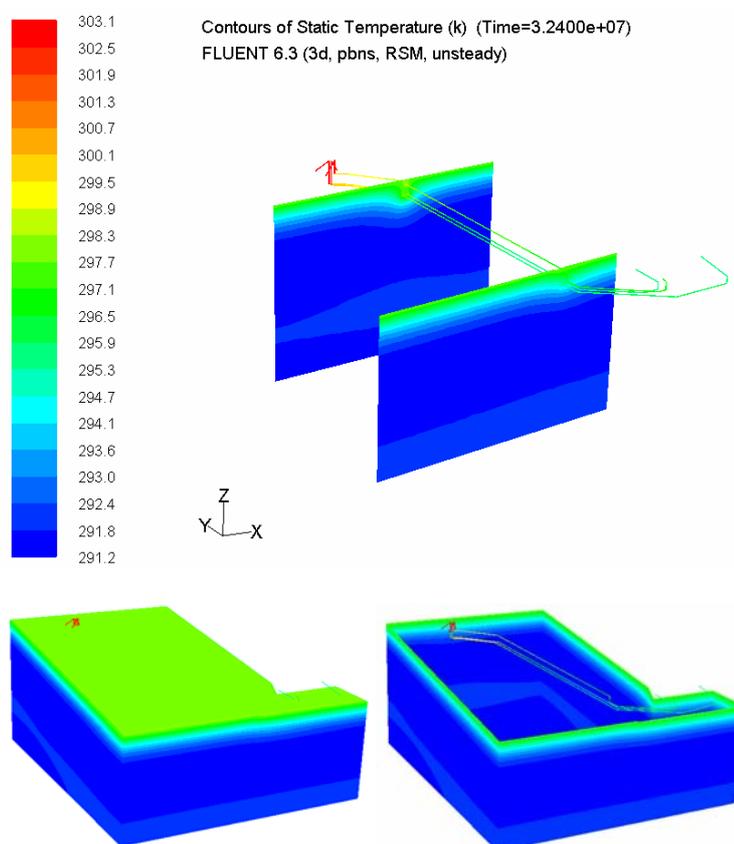


Figura 91: Perfis de temperatura do solo – dia de verão → detalhamento

A temperatura das camadas do solo, por onde passam os dutos, é localmente afetada, como mostrado na figura 91. Coerentemente, a alteração é maior na região próxima à entrada do ar aquecido nos dutos, do que na região de saída do ar dos dutos, quando o ar equilibra sua temperatura com o solo.

6.2.2 Ilustração típica de um dia de inverno

Da mesma forma anterior, a figura 92 e a figura 93 ilustram a distribuição de temperatura no solo e, também, do ar em escoamento nos dutos, agora para o passo incremental 13500 da análise, correspondente ao dia 17 de julho.

A figura 92 mostra, novamente, os planos virtuais criados no domínio de estudo, para possibilitar a visualização dos perfis de temperatura no solo, perfis estes que são destacados na figura 93.

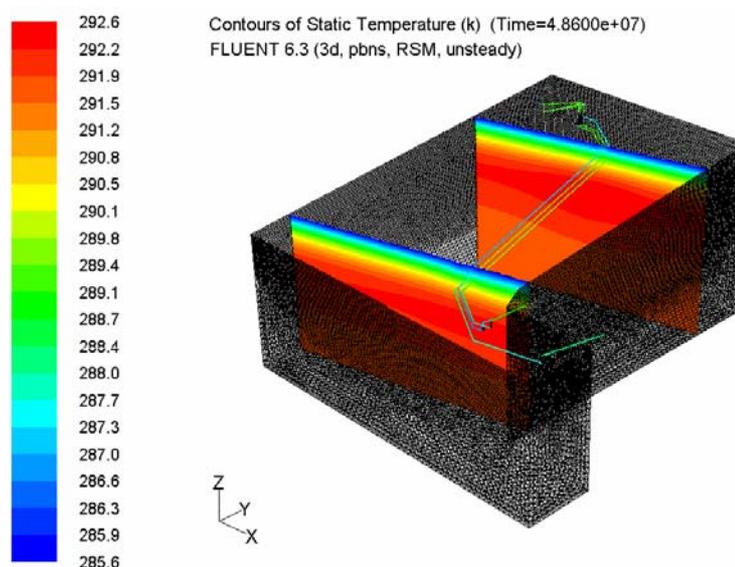


Figura 92: Perfis de temperatura do solo – dia de inverno → identificação dos planos

Na figura 93 aparece a variação de temperatura, ao longo do comprimento dos dutos. A temperatura de entrada do ar no duto, em torno dos 289,3 K, confirma a condição de contorno, definida na tabela 14, para o dia 17 de julho de 2007.

Os perfis de temperatura do solo das figuras 92 e 93 são coerentes com um período frio, de inverno. Na superfície do solo, a temperatura chega próximo aos 285,6 K, valor que confirma a condição de contorno, dada na tabela 14. Para as camadas mais inferiores do solo, a temperatura vai aumentando, tendendo para o valor médio da distribuição, em torno dos 292 K.

Neste dia, representado na figura 93, a temperatura das camadas do solo, por onde passam os dutos, foi pouco afetada.

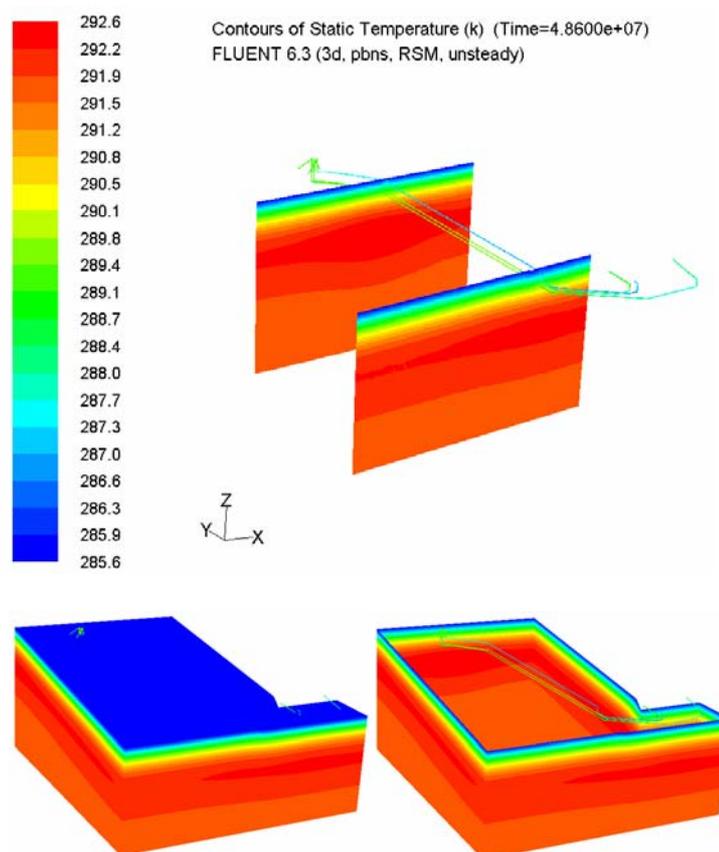


Figura 93: Perfis de temperatura do solo – dia de inverno → detalhamento

6.3 COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO NÃO PERTURBADO

Além das simulações numéricas, descritas anteriormente, com o objetivo de simular numericamente o comportamento do solo não perturbado, pela troca de calor com o ar em escoamento nos dutos, um domínio computacional, análogo ao utilizado para as simulações incluindo o solo e os dutos enterrados (ver figura 81), foi construído sem os dutos.

Das condições de contorno definidas na tabela 14, válidas para a simulação do escoamento do ar nos dutos, foi mantida apenas a variação de temperatura na superfície do solo, reproduzida na tabela 15.

Tabela 15: Condição de contorno na superfície do solo – ciclo anual

Elemento	Condição de Contorno			
	Tipo	UDF - Temperatura (K)	Velocidade (m/s)	Pressão (Pa)
Superfície do solo	Wall	$T=291,7+6,3*\text{sen}((2*\pi*t/365)+26,2)$	-	-

t = tempo – (dia)

Coerentemente, os resultados foram muito próximos aos obtidos com a presença dos dutos, apenas sem as perturbações mostradas nas figuras 91 e 93. A figura 94 e a figura 95 ilustram a distribuição de temperaturas no solo, sem a influência dos dutos, obtidas para um dia de verão e um dia de inverno, respectivamente.

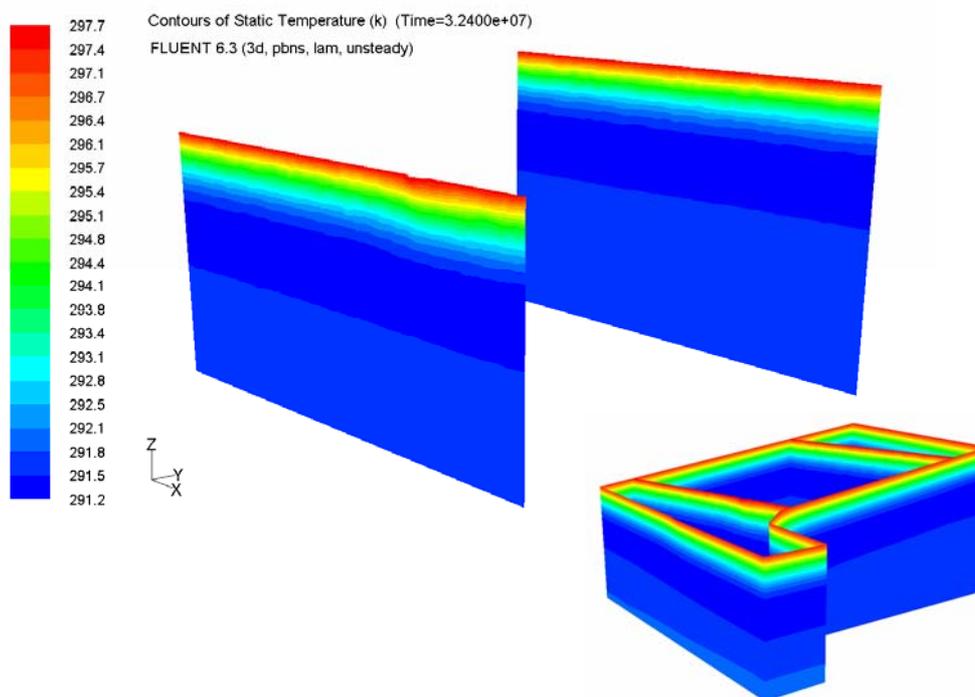


Figura 94: Perfis de temperatura do solo não perturbado – dia de verão

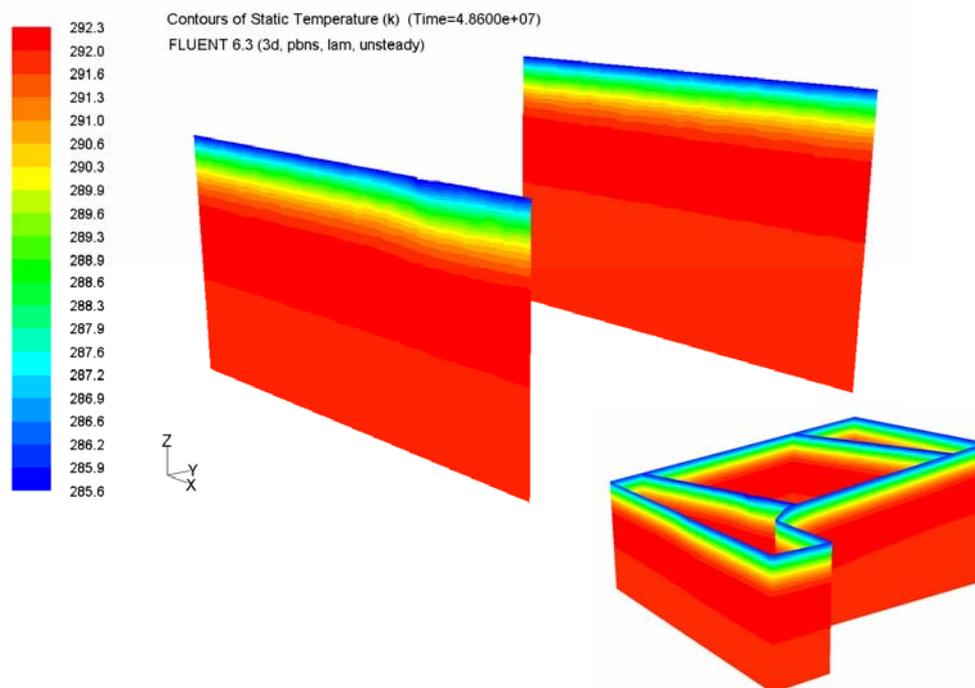


Figura 95: Perfis de temperatura do solo não perturbado – dia de inverno

O resultado mostrado na figura 94 corresponde à simulação numérica da distribuição de temperatura no solo, para o dia 10 de janeiro de 2007, o mesmo dia de verão apresentado na figura 91, quando da simulação com escoamento de ar nos dutos. Coerentemente com o comportamento esperado, seguindo o regime térmico do solo abordado no sub-capítulo 3.2, a superfície do solo mostrou-se com temperatura mais elevada que as camadas inferiores. O valor predito para esta temperatura, na superfície, de 297,7 K, é compatível com a condição de contorno definida na tabela 15.

A temperatura diminuiu com a profundidade, até uma dada profundidade; após, manteve-se constante, com valor próximo a 291,8 K. Este valor também é compatível com a condição de contorno, definida na tabela 15.

Por sua vez, o resultado mostrado na figura 95 corresponde à simulação numérica da distribuição de temperatura no solo, para o dia 17 de julho de 2007, o mesmo dia de inverno apresentado na figura 93, quando da simulação com escoamento de ar nos dutos. Também, coerentemente com o comportamento esperado, seguindo o regime térmico do solo abordado

no capítulo 4, a superfície do solo se mostrou com temperatura menor que a temperatura de camadas inferiores. O valor predito para esta temperatura, na superfície, de 285,6 K, é compatível com a condição de contorno definida na tabela 15.

A temperatura aumentou com a profundidade, até uma dada profundidade; após, manteve-se constante, com valor próximo a 291,8 K. Este valor também é compatível com a condição de contorno definida na tabela 15.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente pesquisa tem como objeto os sistemas formados pelo solo e dutos enterrados, para circular ar ambiente, sistemas esses que são conhecidos, na literatura, como trocadores de calor solo-ar. A premissa científica foi a de o solo, na região do estudo (município de Viamão-RS), ter potencial para, nos períodos frios, aquecer, ou, nos períodos quentes, resfriar o ar ambiente circulado pelos dutos e, assim, contribuir para diminuir o consumo de energias convencionais no aquecimento e resfriamento de ambientes construídos.

Básica e temporalmente, a abordagem ao objeto de estudo deu-se em duas etapas, seguindo os fatos, desafios e definições que se sucederam no processo de execução da pesquisa: uma, no âmbito do trabalho experimental desenvolvido; outra, no processo de simulação numérica, complementar e comparativo, aos dados experimentais.

Estas abordagens se estruturaram a partir dos objetivos intermediários definidos no estudo, que foram todos plenamente alcançados no processo, conforme se considera a seguir, para cada etapa.

7.1. ETAPA DO EXPERIMENTO

Objetivo intermediário → *Planejar um experimento para fazer o ar ambiente externo circular por dutos enterrados (trocadores de calor solo-ar) e ser usado com ar de renovação.*

- Por ter um objeto complexo, como explicado no sub-capítulo 2.1, a experimentação foi entendida, conceitualmente, como estruturada em três partes, que se integravam: o que se chamou o “**sistema de ar**”, composto pelo solo, dutos enterrados e o ar externo; o que se definiu como o “**sistema de água**”, composto pelo reservatório de água, *fan-coil* e a água; e a “**Casa Ventura**”, com os ambientes internos, para a qual confluíam os sistemas referidos acima. A figura 6 ilustra e a figura 7 detalha este planejamento.

Objetivo intermediário → *Conceber a Casa Ventura com dois ambientes centrais, com características dimensionais e de envolvente equivalentes, constituindo os ambientes a serem monitorados no processo, sendo um na condição natural, referencial, sem renovação de ar, e o outro, com renovação de ar.*

- O projeto conceitual da edificação foi desenvolvido por um grupo de alunos do Norie, na disciplina de Edificações e Comunidades Sustentáveis do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Foi projetada uma pequena edificação, visando à consecução desta pesquisa e, também, sua utilização futura, definida como um espaço pedagógico, destinado aos filhos dos funcionários e clientes do Empreendimento Vila Ventura, onde seriam desenvolvidas habilidades na área da floricultura e jardinagem. Denominada, pelos alunos, de Casa Ventura, a edificação foi projetada buscando um relacionamento harmonioso com a natureza, pelo uso de materiais reaproveitados e técnicas construtivas existente na região. O projeto executivo da edificação foi elaborado dentro do escopo do trabalho desenvolvido para a pesquisa e encontra-se ilustrado no item 4.4.1. A edificação foi concebida com os dois ambientes centrais: o ambiente A, previsto para ter renovação de ar; e o ambiente B, referencial, sem renovação de ar.

Objetivo intermediário → *Definir a geometria e a configuração dos trocadores de calor solo-ar.*

- Os trocadores de calor solo-ar não foram dimensionados na pesquisa. Composto o “sistema de ar” na pesquisa, foram definidos em função da disponibilidade de canos de PVC, no estoque de materiais para reaproveitamento existente no Empreendimento Vila Ventura.
- Foram planejados três trocadores de calor solo-ar: dois, posicionados na profundidade de 1,60 m, dutos A e B; e um, na profundidade de 0,50 m, duto C. Os dutos A e C foram previstos para levar ar de renovação ao ambiente A e o duto B, ao ambiente B, quando do uso da edificação. Durante o experimento, somente o ar do duto A foi aproveitado como ar de renovação, para o ambiente A. A circulação de ar nos dutos B e C foi mantida apenas para fins de monitoramento na pesquisa.

Objetivo intermediário → *Montar o experimento, incluindo a construção da Casa Ventura, os dutos enterrados e o sistema de monitoramento e aquisição de dados.*

- A consecução do experimento incluiu, basicamente, a montagem do “sistema de ar”, a montagem do “sistema de água” e a construção da Casa Ventura, o que está descrito e documentado no sub-capítulo 4.4. Concebeu, também, o planejamento e montagem do sistema de aquisição de dados na pesquisa, conforme o sub-capítulo 4.6.

Objetivo intermediário → *Monitorar, além da temperatura do solo, a temperatura e a umidade: do ar externo, do ar nos ambientes internos e do ar em escoamento nos dutos enterrados, bem como a velocidade de seu escoamento nos mesmos.*

- Foi um propósito no processo da pesquisa usar, para o monitoramento de temperaturas e umidades, sensores e controladores comerciais. A opção foram os equipamentos fabricados pela *Full Gauge Controls*, os quais incluíam a possibilidade de gerenciamento remoto (*on line*) da aquisição de dados, pelo uso do sistema Sitrad. Os monitoramentos das velocidades do ar e da água em escoamento nos dutos estão detalhados nos sub-capítulos 4.7 e 4.8, respectivamente.

Objetivo intermediário → *Montar um banco de dados, para fundamentar as análises atreladas ao objetivo definido.*

- O banco de dados produzido na pesquisa caracteriza-se por uma parte mais abrangente, de dados correspondentes às propriedades térmicas do solo e às variações temporais da temperatura e umidade do ar ambiente externo, e de temperaturas do solo, na região do experimento. Outra parte, mais aplicada ao estudo, de velocidades e vazões do ar em escoamento no “sistema de ar” e de vazões da água em escoamento no “sistema de água”, respectivamente, bem como, de variações temporais das temperaturas e umidades do ar interno aos ambientes da Casa Ventura;
- O banco de dados resultou do monitoramento das variáveis durante todo o ano de 2007. Os dados de temperatura e umidade foram registrados, pelo sistema Sitrad, a cada meia hora. Por limitações operacionais, o “sistema de água” foi ativo, na pesquisa, tão somente, entre 8 de janeiro e 4 de fevereiro de 2007.

O processo considerado acima, de consecução dos objetivos intermediários, estabeleceu os fundamentos e ordenou o processo de análises na pesquisa. A experiência acumulada nesta etapa e, principalmente, o banco de dados obtido, disponibilizaram as informações e

condições para alcançar o primeiro objetivo principal do estudo, o qual é transcrito a seguir, com a finalidade de facilitar a sequência da leitura.

PRIMEIRO OBJETIVO PRINCIPAL

Avaliar a técnica de dutos enterrados no solo, a partir da circulação do ar ambiente através dos mesmos, aproveitando a inércia térmica do solo, como estratégia para diminuir o consumo de energia convencional, no condicionamento térmico de ambientes construídos e, em particular, em uma edificação construída para o estudo (identificada, na pesquisa, como Casa Ventura).

A proposição do estudo foi de identificar parâmetros, procedimentos e condições favoráveis, envolvendo o uso desta técnica, o que se encontra plenamente estabelecido no capítulo 5, na apresentação dos resultados e análise dos resultados da pesquisa. Na sequência, estes achados são considerados em seus aspectos mais significativos, na valoração subjetiva do processo de análises.

- O perfil do solo, no local da pesquisa, foi identificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, originário de rocha granítica, com peso específico igual a 1800 kg/m^3 e teor de umidade natural médio de 25 %. A difusividade térmica foi determinada igual $0,057 \text{ m}^2/\text{dia}$; a capacidade térmica, igual a $3.200 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ e a condutividade térmica, igual a $2,1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.
- A temperatura do ar ambiente externo, monitorada no local da pesquisa, no ano de 2007, variou entre os extremos de $-1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ e $36,5 \text{ }^\circ\text{C}$. O valor médio da distribuição de temperaturas foi $18,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e a amplitude, $6,2\text{K}$.
- A variação de temperatura na superfície do solo foi admitida, no estudo, igual à registrada para a profundidade de $0,05 \text{ m}$ e o monitoramento mostrou que esta variação foi muito próxima à variação de temperatura do ar externo.
- Analisando-se o efeito da profundidade na temperatura do solo, verificou-se que, considerando valores médios diários, esta esteve acima da temperatura do ar externo entre os meses de março a outubro de 2007. As máximas diferenças ocorreram entre o final de junho e metade de julho, atingindo os valores de $2,5\text{K}$, $3,3\text{K}$, $6,4\text{K}$ e $6,8\text{K}$, para as

profundidades de 0,5 m, 1,0 m, 2,0 m e 3,0 m, respectivamente. Nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro de 2007, basicamente, ocorreu ao contrário: a temperatura do solo esteve abaixo da temperatura do ar externo. As máximas diferenças (negativas) ocorreram entre o final de dezembro e metade de janeiro, atingindo os valores de -1,7K, -2,4K, -4,0K, para as profundidades de 1,0 m, 2,0 m e 3,0 m, respectivamente.

- Na análise comparativa entre a temperatura do ar externo e a temperatura do solo, observou-se que, dependendo da profundidade analisada, como não poderia deixar de ser, em alguns dias a temperatura do ar externo se manteve abaixo ou acima das temperaturas do solo; entretanto, com frequência, em dias mais quentes, a temperatura do ar externo foi maior que as temperaturas do solo, durante o dia, e menor à noite, mas nem sempre. Em outros dias, mais frios, a temperatura do ar externo foi menor que a temperatura do solo, dia e noite, mas também nem sempre. Sendo a finalidade circular o ar externo por dutos enterrados, para melhorar as condições térmicas de ambientes construídos, a percepção foi que este processo pode ser otimizado, a partir da adoção de um sistema operacional inteligente, de gerenciamento de seu funcionamento, que permita a troca térmica somente em períodos favoráveis à condição de conforto térmico do ambiente.
- De forma geral, as análises mostraram o potencial do solo para aquecer maior do que para resfriar o ar externo circulante em dutos enterrados. O potencial para aquecimento foi maior nos meses de maio, junho, julho e agosto e o de resfriamento nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro.
- Este potencial, quando expresso por valores médios mensais (ver item 5.6.3), positivos (de aquecimento do ar) ou negativo (de resfriamento do ar), correspondentes as diferenças de temperatura entre o solo e o ar externo, monitoradas na pesquisa, mostrou que, para pequenas profundidades (menos de 1 m), o potencial operacional para um sistema de aquecimento do ar circulante em dutos enterrados foi baixo, menos de 2K, para 0,5 m de profundidade, e pouco mais que 2K, para a profundidade de 1,0 m. Mas, para profundidades de 2,0 m ou mais, este potencial pode ser superior a 8K e, para resfriamento nestas profundidades maiores, este potencial pode chegar a 4K.
- Seguindo os valores médios mensais, referidos no item anterior, nos meses em que o solo apresentou maior potencial de aquecimento do ar externo, que foram maio, junho, julho e agosto, a temperatura do ar externo se manteve abaixo da temperatura do solo, entre 19 e

23 horas por dia, dependendo da profundidade. Por outro lado, nos meses em que o solo apresentou maior potencial para resfriamento do ar externo, que foram janeiro, fevereiro e dezembro, a temperatura do ar externo se manteve acima da temperatura do solo, entre 17 e 22 horas por dia, dependendo da profundidade, exceto para a profundidade de 0,5 m, onde este tempo não passou de 12 horas por dia.

- O escoamento do ar externo, pelo trecho central (profundidade constante – 1,60 m) do duto A, foi usado, como referência, para análise das trocas térmicas ocorridas nos trocadores de calor solo-ar na pesquisa (ver item 5.6.4). Os valores médios mensais, positivos (de aquecimento do ar) ou negativo (de resfriamento do ar), calculados das diferenças de temperatura do ar neste trecho, monitoradas na pesquisa, estabeleceram esta troca térmica num percentual, em média, de 48 % dos valores que seriam possíveis, ou seja, do potencial do solo de Viamão em trocar calor com este próprio ar, em escoamento no duto.
- Nos meses em que o ar mais se aqueceu, ao passar pelo trocador de calor solo-ar, que foram abril, maio, junho, julho e agosto, a temperatura do ar na posição de início manteve-se abaixo da temperatura na posição final do trecho central monitorado, entre 20 e 24 horas, por dia. Por outro lado, este comportamento se inverteu nos meses em que o ar mais se resfriou, ao passar pelo trocador de calor solo-ar, que foram janeiro, fevereiro e dezembro. Neste último caso, a temperatura do ar no início se manteve acima da temperatura no final do trecho monitorado, entre 17 e 20 horas por dia.
- Construída em alvenarias de pedra grés e com cobertura verde, a edificação usada na experimentação (Casa Ventura) respondeu termicamente de forma bastante adequada, em relação às oscilações de temperatura do ar externo. Enquanto, no ano de 2007, a temperatura do ar externo variou entre valores negativos de -1 °C e máximos superiores a 36 °C, a temperatura do ambiente A (com renovação de ar) oscilou entre limites mais confortáveis, pouco abaixo dos 13 °C e pouco acima dos 30 °C. Com a mesma tendência, no ambiente B (sem renovação de ar), a oscilação ficou entre 11 °C e 31 °C.
- Os comportamentos térmicos dos ambientes A e B, da Casa Ventura, foram muito próximos no estudo. Cabe destacar, entretanto, que o ar do ambiente A foi constantemente renovado, com ar externo circulado no duto enterrado, na proporção de uma vez e meia seu volume por hora, enquanto o ar do ambiente B não foi renovado; ou

seja, o ambiente foi mantido fechado durante o estudo. A renovação do ar, feita no ambiente A, foi equivalente a uma ventilação natural do ambiente e foi proposta, no experimento, para cumprir com a exigência mínima de higiene deste ar, quando da utilização do ambiente. Portanto, se os ambientes tivessem sido testados e monitorados para a condição de uso, com geração interna de calor, o ambiente A teria, naturalmente, uma resposta mais adequada que o ambiente B, tanto em termos de temperatura, como de higiene do ar.

O “sistema de água” esteve ativo por pouco tempo na pesquisa, por isso deixou de ser um objetivo do estudo, embora seus registros e efeitos, principalmente, sobre a variação de temperatura do ar interno da Casa Ventura, tenham sido considerados nas análises realizadas no capítulo 5. Por pouco que tenha sido monitorado, foi significativo o efeito da troca térmica entre a água e este ar interno, circulados pelo *fan-coil*, colocado no ambiente, no contexto das variações de temperatura do ar interno da Casa Ventura.

7.2. ETAPA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Objetivo intermediário → *Construir um domínio computacional para possibilitar a simulação numérica, usando o software GAMBIT.*

- O domínio construído para o estudo computacional abrangeu um corte no terreno real, com volume aproximado de 14.500 m^3 , correspondente a uma superfície, ao nível do terreno local, de 900 m^2 , a qual foi modelada de forma a reproduzir os declives, aclives e planos existentes no terreno. A proposta foi, dentro do possível, reproduzir computacionalmente o que se construiu no experimento.
- Na modelagem não foi considerada a espessura das paredes dos dutos. Desta forma, no modelo, foi admitido o ar escoando por furos feitos no solo, em contato direto com o mesmo. A interação entre o ar e o solo foi garantida, admitindo-se faces comuns entre os volumes correspondentes, conforme detalhado no sub-capítulo 6.1.

Objetivo intermediário → *Obter valores preditos, através da simulação numérica com o uso do software FLUENT, das temperaturas do ar, em escoamento nos trocadores de calor solo-ar e do solo, ao entorno deles.*

- Nesta etapa, definida a abrangência da análise, foram informadas ao *software* as propriedades dos materiais, as condições de contorno e as condições iniciais do problema, conforme descrito no sub-capítulo 6.1.
- Como resposta, o *software* disponibilizou: a variação de temperatura predita para o ar em escoamento nos dutos; e a distribuição de temperatura no solo, incluindo as alterações no entorno dos dutos, decorrentes do processo de troca térmica com o ar circulante nos mesmos.

Objetivo intermediário → *Apresentar os resultados preditos com o uso do software FLUENT.*

- Os resultados estão plenamente apresentados no sub-capítulo 6.2, na forma de gráficos comparativos com os resultados experimentais e, também, em ilustrações, das variações de temperatura, em escala de cores.

Da mesma forma que na etapa do experimento, o processo considerado acima, de consecução dos objetivos intermediários, estabeleceu os fundamentos e ordenou o processo de análise numérica na pesquisa. O aprendizado nesta etapa e, principalmente, os resultados preditos, disponibilizaram as informações e condições para alcançar o segundo objetivo principal do estudo, o qual, também, é transcrito a seguir, com a finalidade de facilitar a sequência da leitura.

SEGUNDO OBJETIVO PRINCIPAL

Comparar os resultados experimentais com valores preditos em simulações numéricas do escoamento do ar, nos trocadores de calor solo-ar do experimento, usando CFD (Computational Fluid Dynamics).

A proposição do estudo foi comparar os resultados preditos numericamente, pelo uso do *software* FLUENT, com os resultados experimentais, o que se encontra no capítulo 6. Na sequência, estas comparações são consideradas em seus aspectos relevantes.

- Na simulação numérica dos trocadores de calor solo-ar foram preditos valores das variações de temperatura do ar, em escoamento nos dutos, para as mesmas posições

monitoradas na pesquisa: posição 2 (entrada – $x=0,0$ m); posição 3 ($x=11,0$ m); posição 4 ($x=34,0$ m); e posição 5 (saída – $x=42,0$ m). Para os três dutos, considerando a posição de entrada, as curvas obtidas dos dados experimentais e as curvas numéricas previstas pelo FLUENT coincidem; ou seja, as curvas ajustadas aos valores experimentais e informadas ao FLUENT, como condição de contorno (UDFs), foram reproduzidas pelo *software*. Para as demais posições monitoradas: no duto A, o erro máximo, em valor absoluto, entre as curvas foi de 8,1 %, na posição 3; de 13,2 %, na posição 4, atingindo valor de 15,4 %, na posição de saída do ar do duto. Para os dutos B e C não foram feitos registros de temperaturas nas saídas do ar dos dutos. Para a posição 3, neste dutos, os erros foram 7,0 % e 12,8 %, respectivamente. Já, para a posição 4, os erros foram 12,8 % e 15,2 %, respectivamente.

- O destaque do item anterior está no sentido de contextualizar as diferenças observadas entre os resultados experimentais e os produzidos pelo FLUENT, nos casos analisados, as quais foram pequenas (inferiores a 15%) e confirmam a viabilidade das análises realizadas e de ser possível utilizar o procedimento numérico desenvolvido, para prever o comportamento térmico dos trocadores de calor solo-ar.
- A troca de calor do ar, em escoamento pelos trocadores de calor solo-ar, perturbou a distribuição de temperatura do solo, no entorno dos dutos, como mostram os perfis em escala de cores do FLUENT, nos itens 6.2.1 e 6.2.2. Esta perturbação, coerentemente, mostrou-se mais acentuada no trecho inicial dos dutos enterrados.

7.3. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho, em seu desenvolvimento, envolveu métodos analíticos, numéricos computacionais e experimentais com a finalidade de promover uma análise abrangente do uso de trocadores de calor solo-ar. Além dos objetivos alcançados, algumas de suas contribuições se projetam com potencial para continuidade e, mesmo, ampliação do campo de estudo. Entre outras partes, pode-se considerar para trabalhos futuros, os fatos e sugestões destacados a seguir.

- Gerou-se na pesquisa, um banco de dados experimentais sobre as propriedades e características do solo (índices físicos, difusividade térmica, capacidade térmica volumétrica, condutividade térmica, temperatura e umidade) e do ar ambiente

(temperatura e umidade) para o município de Viamão, localizado na região sul do Brasil, o qual pode ser usado para a continuidade desta pesquisa ou para a elaboração de novas pesquisas e projetos.

- Neste banco de dados, estão também os registros referentes ao “sistema de água”, que foram escassos no experimento, mas que, analisados, instigam continuar a pesquisa com o propósito de usar água, contida em um reservatório ou em outro continente qualquer, natural ou artificial, para trocar calor com o ar interno de ambientes construídos, com ajuda de *fan-coil* e, assim, contribuir para amenizar a temperatura destes ambientes.
- Desenvolveu-se no estudo, uma metodologia para a modelagem computacional de trocadores de calor solo-ar, validada através dos dados experimentais, possibilitando o emprego deste procedimento numérico para a elaboração de projetos ou novas pesquisas na área. Entre outros aspectos, poderá ser simulado, o efeito de modificações nos seguintes parâmetros: na geometria dos dutos (diâmetros, comprimentos e afastamentos); na configuração do trocador; na velocidade de escoamento do ar; e na perturbação e recuperação de temperatura do solo, afetado pelas trocas térmicas, com o ar em escoamento nos dutos.
- Outro estudo, de interesse no refinamento da pesquisa, consistente e possível, a partir da metodologia desenvolvida, bem como pelo banco de dados disponível, é a inclusão do ciclo diário, no processo de simulação numérica desenvolvido, modelando suas implicações nas variações temporais (temperaturas e umidade), envolvidas na pesquisa.
- A simulação térmica do ambiente construído, a partir do uso de um *software* aplicado, tipo EnergyPlus, apresenta-se como outra indicação para trabalhos futuros. Neste sentido, foi realizada, na abrangência desta pesquisa, usando o GAMBIT e o FLUENT, a modelagem computacional da variação térmica no ambiente A, o qual recebeu ar de renovação durante a experimentação, buscando a validação do processo de análise, por meio dos resultados experimentais. No entanto, em função do não monitoramento de algumas variáveis, necessárias a definição das condições de contorno e iniciais do problema, bem como diante do tempo requerido para processamento das simulações, a cada modificação destas condições de contorno e iniciais, ficou inviabilizada a continuidade do estudo e a apresentação dos resultados obtidos.

- O desenvolvimento de *software* para o gerenciamento de sistemas inteligentes, que possibilitem otimizar o processo operacional de trocas térmicas entre o solo e o ar ambiente, visando aperfeiçoar o aproveitamento deste ar como ar de renovação em ambientes construídos, é outra sugestão para trabalho futuro. Os sistemas poderão ser limitados ao controle de temperatura e umidade do ar ou abranger o controle de vazões e o direcionamento destas vazões, bem como, poderão, complementarmente, incluir o controle da qualidade do ar ambiente.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE); 2000. **Chapter 11**: District Heating and Cooling. Systems and Equipment Handbook (SI). Atlanta/Georgia/US, 2000.
- ATHIENITIS, A. K.; ROY, M.; ZHAO, M.; 2005. Design and simulation of a hybrid ventilation system with earth-air heat exchanger. **Building Simulation**, v. 21, 2005, p. 27-32.
- BANSAL, V.; MISRA, R.; AGRAWAL, G. D.; MATHUR, J.; 2009. Performance analysis of early-pipe-air heat exchanger for winter heating. **Energy and Buildings**, v. 41, 2009, p. 1151-1154.
- BANSAL, V.; MISRA, R.; AGRAWAL, G. D.; MATHUR, J.; 2010. Performance analysis of early-pipe-air heat exchanger for summer cooling. **Energy and Buildings**, v. 42, 2010, p. 645-648.
- BASTOS, C. A. B.; VAZ, J.; GIASSON, E.; SATTLER, M. A.; 2009. Caracterização morfológica e física de um perfil de argissolo para aproveitamento do subsolo no conforto ambiental de edificações. **In**: Anais do V Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, Resumos, 2009, p. 30, 2009.
- BHARADWAJ, S. S.; BANSAL, N. K.; 1981. Temperature distribution inside ground for various surface conditions. **Building and Environment**, v. 16, Issue 3, 1981, p. 183-192.
- BORTOLI, A. L.; 2000. **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**. Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 134 p.
- BOULARD, T.; RAZAFINJOHANY, E.; BAILLE, A.; 1989. Heat and water vapour transfer in a greenhouse with an underground heat storage system - part I. Experimental results. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 45, Issues 3-4, March 1989, p. 175-184.
- BOULARD, T.; RAZAFINJOHANY, E.; BAILLE, A.; 1989a. Heat and water vapour transfer in a greenhouse with an underground heat storage system - part II. Experimental results. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 45, Issues 3-4, March 1989, p. 185-194.
- BRASIL; 2009. **Resenha Energética Brasileira** – Exercício 2008/Abril 2009 – Ministério de Minas e Energia, 2009. Disponível em www.mme.gov.br, acessado em 19/01/2010.
- DESCHAMPS, C. J.; 2002. **Turbulência**. Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- ENEA; 1983. **Architettura bioclimatica**. Italian commission for nuclear and alternative energy sources. Roma/Itália: De Luca Editori d'Arte, 79 p.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M.; 1997. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Springer, Berlim, 364 p.

FIGUEIREDO, D. J.; 2004. **Vikings: Mais que um povo, um ideal**. Disponível em www.klepsidra.net, acessado em 01/03/2004.

FLORIDES, G.; KALOGIROU, S.; 2007. Ground heat exchangers – A review of systems, models and applications. **Renewable Energy**, v, 32, 2007, p. 2461 – 2478.

FLUENT 6.3. **Documentation Manual**. Disponível em <http://www.fluent.com>, acessado em 12/11/2007.

FORTUNA, A. O.; 2000. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos – Conceitos Básicos e Aplicações**. Edusp, São Paulo, 426 p.

GARCIA, M. C. R.; 2001. **Simulação numérica de um sistema de armazenamento de calor em estufas de plasticultura**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2001.

GAUTHIER, C.; LACROIX, M.; BERNIER, H.; 1997. Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses. **Solar Energy**, v. 60, n. 6, p. 333-346,

GIL, A. C.; 2009. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. 12. reimpr. São Paulo: Atlas, 2009. 175 p.

GIVONI, B.; KATZ, L.; 1985. Earth temperatures and underground buildings. **Energy and Buildings**, v. 8, 1985, p. 15-25.

HOLLMULLER, P.; 2002. **Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments**: Mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique. Tese de doutorado, Universidade de Genebra, Suíça, 2002, Tese nº 3357.

HOLLMULLER, P.; 2003. Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers, **Int. Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, 2003, p. 4303-4317. Disponível em www.sciencedirect.com.

HOLLMULLER, P.; LACHAL, B; 2001. Cooling and preheating with buried pipe systems: monitoring, simulation and economic aspects. **Energy and Buildings**, v. 33, 2001, p. 509-518.

HOLLMULLER, P.; CARLO, J.; ORDENES, M.; WESTPHAL, F.; LAMBERTS, R.; 2006. **Potencial of buried pipes systems and derived techniques for passive cooling of buildings in Brazilian climates**. Genève: Universté de Genève: CUEPE - Centre Universitaire D'Étude des Problèmes de L'Énergie, 2006.

INCOPRERA, F. P.; DeWITT, D. P.; 1998. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. , Rio de Janeiro, 494 p, 1998.

JACOVIDES, C. P.; MIHALAKAKOU, G.; 1995. An underground pipe system as na energy source for cooling/heating purposes. **Renewable Energy**, v. 6, n. 8, 1995, p. 893-900.

JACOVIDES, C. P.; MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; LEWIS, J. O.; 1996. On the ground temperature profile for passive cooling applications in buildings. **Solar Energy**, v. 57, n. 3, 1996, p. 167-175, 1996.

JUNG, C. F.; 2004. Metodología Científica – Ênfase em pesquisa tecnológica. **Publicação Eletrônica**, 4ª edição, 2004. Disponível em: <http://www.jung.pro.br> (acessado em 15 de Janeiro de 2011).

KREITH, F.; BOHN, M. S.; 2003. **Princípios de Transferência de Calor**. Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 623 p, 2003.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PAPST, A. L. **Desempenho térmico de edificações**. Florianópolis: LABEE/NPC/DEC/CTC/UFSC, 2000

LARSEN, S. F.; FILIPPÍN, C.; LESINO, G.; 2003. Earth-to-air heat exchange through a buried pipe at a school in La Pampa. Argentina, **In: PLEA 2003 – The 20th Conference on Passive and Low Energy Architecture**, Santiago – CHILE, 9-12, November 2003.

LEVIT, H. J.; GASPAR, R.; PIACENTINI, R.D.; 1989. Simulation of greenhouse microclimate produced by earth tube heat exchangers. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 47, 1989, p. 31-47.

MALISKA, C. R.; 2004. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 453 p, 2004.

MAVROYANOPOULOS, G. N.; KYRITSIS, S.; 1986. The performance of a greenhouse heated by an earth-air heat exchanger. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 36, Issue 3, February 1986, p. 263-268.

MIHALAKAKOU, G.; LEWIS, J. O.; SANTAMOURIS, M.; 1996. The influence of different ground covers on the heating potential of earth-to-air heat exchangers. **Renewable Energy**, v. 7, n. 1, 1996, p. 33-46.

MIHALAKAKOU, G.; LEWIS, J. O.; SANTAMOURIS, M.; 1996a. On the heating potential of buried pipes techniques – application in Ireland. **Energy and Buildings**, v. 24, 1996, p. 19-25.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D.; 1992. Modelling the earth temperature using multiyear measurements, **Energy and Buildings**, v. 19, 1992, p. 1-9.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. N.; 1994. Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers, **Solar Energy**, v. 53, n. 3, 1994, p. 301-305.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D.; 1994a. Use of the ground for heat dissipation. **Energy**, v. 19, n. 1, 1994, p. 17-25.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D.; 1994b. On the cooling potential of earth to air heat exchangers. **Energy Convers. Mgmt.**, v. 35, n. 5, 1994, p. 395-402.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. N.; ARGIRIOU, A.; 1995. On the ground temperature below buildings. **Solar Energy**, v. 55, n. 5, 1995, p. 355-362.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. N.; PAPANIKOLAOU, N.; 1994. Impact of ground cover on the efficiencies of earth-to-air heat exchangers, **Applied Energy**, v. 48, 1994, p. 19-32.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D.; TSELEPIDAKI, I.; 1995. Parametric prediction of the buried pipes cooling potential for passive cooling applications. **Solar Energy**, vol. 55, n 3, 1995, p. 163-173.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; LEWIS J. O.; ASIMAKOPOULOS, D. N.; 1997. On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. **Solar Energy**, v. 60, ns. 3/4, 1997, p. 181-190.

MIMOSO, J. M.; 1987. **Transmissão de calor** – bases teóricas para aplicação à térmica de edifícios. Lisboa, LNEC, 1987, 154 p.

MORELAND, F. L.; 1976. An alternative to suburbia, **Proc. of Conf. on Alternatives in Energy Conservation: The Use of Earth-covered Buildings**, Fort Worth, Texas, July 9 – 12, 1975, U. S. Printing Office, 1976, p. 203 – 204.

RODRIGUEZ, H. A. L.; 2005. **Simulação numérica da transferência simultânea de energia e umidade através do solo em um sistema trocador-armazenador de calor**. Tese de doutorado, Universidade Federal do rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em engenharia Mecânica, 2005.

SANTAMOURIS, M.; MIHALAKAKOU, G.; ARGIRIOU, A.; ASIMAKOPOULOS, D. N.; 1995. On the performance of buildings coupled with earth to air heat exchangers. **Solar Energy**, v. 54, n. 6, 1995, p. 375-380.

SANTAMOURIS, M.; MIHALAKAKOU, G.; BALARAS, C. A.; ARGIRIOU, A.; ASIMAKOPOULOS, D.; VALLINDRAS, M.; 1995. Use of buried pipes for energy conservation in cooling of agricultural greenhouses. **Solar Energy**, v. 55, n. 2, 1995, p. 111-124.

- SANTAMOURIS, M.; MIHALAKAKOU, G.; BALARAS, C. A.; LEWIS, J. O.; VALLINDRAS, M.; ARGIRIOU, A.; 1996. Energy conservation in greenhouses with buried pipes, **Energy**, v. 21, n. 5, 1996, p. 353-360.
- SODHA, M. S.; BUDDHI, D.; SAWHNEY, R. L.; 1991. Thermal performance of underground air pipe: Different earth surface treatments. **Energy Conversion and Management**, v. 31, Issue 1, 1991, p. 95-104.
- SODHA, M. S.; BUDDHI, D.; SAWHNEY, R. L.; 1993. Optimization of pipe parameters of underground air pipe cooling system. **Energy Conversion and Management**, v. 34, Issue 6, June 1993, p. 465-470.
- STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C. do; SCHNEIDER, P.; 2002. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS, 2002.
- SZOKOLAY, S. V.; 1980. **Environmental Science Handbook**: for Architects and Builders. Lancaster/Londres: The Construction Press, 1980.
- TROMBE, A; SERRES, L.; 1994. Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation. **Energy and Buildings**, v. 21, Issue 2, 1994, p. 155-162.
- TZAFERIS, A.; LIPARAKIS, D.; SANTAMOURIS, M.; ARGIRIOU, A.; 1992. Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers. **Energy and Buildings**, v. 18, 1992, p. 35-43.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W.; 1999. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. Longman, Malaysia, 257 p.
- WILCOX, D. C.; 2002. **Turbulence Modeling for CFD**. DCW Industries, USA.
- ZHANG, J.; HAGHIGHAT, F.; 2009. Convective heat transfer prediction in large rectangular cross-sectional area earth-to-air heat exchangers. **Building and Environment**. v. 44, p. 1892-1898.