

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA
DE ENERGIA E UMIDADE ATRAVÉS DO SOLO EM UM SISTEMA
TROCADOR-ARMAZENADOR DE CALOR

por

Hugo Ariel Lombardi Rodriguez

Tese para a obtenção do Título de
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, maio de 2005

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA
DE ENERGIA E UMIDADE ATRAVÉS DO SOLO EM UM SISTEMA
TROCADOR-ARMAZENADOR DE CALOR

por

Hugo Ariel Lombardi Rodriguez
Mestre em Engenharia

Tese submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientadora: Prof^a. Dra. Ligia Damasceno Ferreira Marczak

Aprovada por:

Prof. Dr. Ramón Molina Valle - UFMG

Prof^a. Dra. Rejane de Césaroliveski – Unisinos

Prof. Dr. Arno Krenzinger - UFRGS

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 23 de maio de 2005

DEDICATÓRIA

À minha Mãe, in memoriam

*À mon épouse Nara, merci
pour la soutenance dans les
temps que nous avons vécu
ensemble.*

AGRADECIMENTOS

À Prof^a. Lígia D. F. Marczak pela sua presteza e dedicação na orientação e pelas várias sugestões que contribuíram ao aprimoramento do presente trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por seu aporte financeiro, que possibilitou a realização deste estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pela contribuição financeira na compra de um microcomputador para o Laboratório de Simulação (LASIM) do Departamento de Engenharia Química, que permitiu reduzir o tempo total de simulação dos diferentes casos analisados neste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho pesquisa o fenômeno da transferência simultânea de calor e umidade em solos insaturados que envolvem dutos enterrados. Estes dutos e o solo envolvente compõem o chamado sistema trocador-armazenador de calor no solo, que é muitas vezes utilizado como fonte complementar de aquecimento em estufas solares agrícolas. O funcionamento do sistema trocador-armazenador de calor é baseado na energia armazenada no solo durante os horários de máxima insolação, sendo que durante a noite parte desta energia é recuperada. Durante o dia o ar quente do meio interno da estufa solar é bombeado para dentro do feixe de tubos enterrados, que devolvem o ar mais frio na outra extremidade. Por outro lado, durante a noite o ar mais frio do meio interno da estufa é bombeado para dentro dos dutos, os quais efetuam troca térmica com o solo envolvente, que neste horário possui a temperatura mais elevada do sistema.

O objetivo geral deste trabalho é resolver o problema transiente periódico e tridimensional da transferência simultânea de calor e umidade em solos não-saturados, que compõem o sistema trocador-armazenador de calor, utilizando a simulação numérica. Como objetivos secundários têm-se: o melhoramento do sistema de troca térmica, a quantificação da parcela de calor transportado pela difusão da umidade no solo e a análise dos campos de temperatura e de conteúdo de umidade, sendo que a análise dos campos de umidade permite verificar se existe formação de frentes de secagem significativas na vizinhança dos dutos durante os sucessivos períodos de aquecimento e resfriamento a que o sistema é submetido.

Na resolução do problema em questão é empregado o modelo clássico de Philip e De Vries para a transferência simultânea de calor e massa em meios porosos insaturados. Neste modelo, as equações de conservação de energia e massa obtidas trazem explicitamente as influências combinadas dos gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade nos processos de transporte de calor e umidade. O sistema de equações diferenciais governantes do problema em questão é resolvido numericamente utilizando o Método dos Volumes Finitos e na discretização destas equações é usada uma integração temporal totalmente implícita. Todas as propriedades difusivas e termofísicas empregadas são consideradas variáveis com a temperatura e o conteúdo de umidade. Os dutos de seção transversal circular do sistema trocador-armazenador de calor no solo, são modelados como dutos de seção transversal quadrada de área equivalente para que coordenadas cartesianas possam ser utilizadas nos modelos analisados.

Neste trabalho são simulados quatro modelos computacionais associados ao sistema trocador-armazenador de calor no solo. Estes modelos são compostos por: um duto isolado, um

duto com convecção, dois dutos isolados e dois dutos com convecção. A variação da temperatura do ar na entrada do(s) escoamento(s), assim como a temperatura do meio ambiente, para os modelos com convecção, é dada por uma senóide com uma amplitude de 14 °C. No modelo de um duto isolado, são realizadas simulações utilizando várias combinações dos parâmetros do modelo em questão e os resultados, assim obtidos, são comparados com aqueles encontrados na literatura.

Visando melhorar o sistema de troca térmica dos modelos computacionais investigados, são selecionados valores e intervalos de valores recomendados para os parâmetros do modelo de um duto isolado. Para este modelo, com um diâmetro de 0,1 m, são escolhidos valores (ou intervalos de valores) recomendados: de 4 m/s para a velocidade do escoamento interno dentro do duto, de 0,25 para o conteúdo de umidade do solo, de 5 até 20 metros para o comprimento do duto e de 0,20 até 0,30 m para a distância entre centros dos dutos.

As simulações dos quatro modelos computacionais realizadas utilizando as várias combinações dos valores recomendados para os parâmetros destes modelos, mostrou que não há diferença significativa entre os valores de calor volumétrico armazenado no solo empregando a resolução acoplada das equações de energia e de massa e a resolução da equação da temperatura. Mesmo para os modelos de um e de dois dutos com convecção a diferença percentual encontrada foi insignificante.

Finalmente, são apresentados e analisados os campos de temperatura e de conteúdo de umidade para os quatro modelos computacionais avaliados. Os perfis de temperatura e de conteúdo de umidade em diferentes horários mostraram que, durante o dia, o solo absorve calor dos escoamentos internos de ar e, uma vez que, junto à superfície dos dutos tem-se regiões de maior temperatura, há, conseqüentemente, uma migração da umidade nestas regiões. Durante a noite, ocorre o contrário, o solo fornece calor aos escoamentos dentro dos dutos, e, desta forma, as regiões próximas aos dutos apresentam níveis de conteúdo de umidade superiores ao inicial. Ainda, os perfis de conteúdo de umidade para todas as situações analisadas mostraram que, não há formação de frentes de secagem significativas nas proximidades dos dutos que compõem os quatro modelos computacionais avaliados.

ABSTRACT

NUMERICAL SIMULATION OF THE SIMULTANEOUS ENERGY AND MOISTURE TRANSFER THROUGH SOIL IN A HEAT EXCHANGER-STORAGE SYSTEM

The present work studies the simultaneous heat and moisture transfer phenomena in an unsaturated soils around buried pipes in a heat exchanger-storage system, which is used as a complementary source of heating in agricultural greenhouses. The operation of the soil heat exchanger-storage system is based on the storage of the heat in the soil during the sunny hours of the day; during the night, part of this heat is recovered. During the day, the hot air inside of the greenhouse is pumped into inside of the bank of buried pipes, which return the colder air back to its other edge. On the other hand, during the night, the colder air of the internal side of the greenhouse is pumped into the pipes, which make the thermal exchange with the soil.

The general objective of this work is to solve the transient, periodic, three-dimensional problem of simultaneous heat and moisture transfer in unsaturated soil in a heat exchanger-storage system, using a numerical methodology. The improvement of the thermal exchange system, the analysis of the importance of the moisture migration in the heat transfer rates and the analysis of the temperature and moisture contents fields are also objectives of this work. Based on the moisture content fields, the existence of significant drying fronts around the pipes during the successive periods of heating and cooling are investigated.

The classical model by Philip and De Vries for the simultaneous heat and mass transfer in an unsaturated porous media is used in the formulation of the problem. In this model, the governing equations are written in such a way that the influences of the thermal and moisture content gradients are explicit in the heat and mass transport processes. The governing equation is solved numerically using the Finite Volume Method with a totally implicit temporal discretization. All the diffusivities and thermo physical properties of the medium are considered variables with temperature and moisture content. The pipes of circular cross-section of the heat soil exchanger-storage system are modeled as pipes of square cross-section with equivalent areas so that simple Cartesian Coordinates system could be used.

Four different computational models are used to simulate the soil heat exchanger-storage system: a single adiabatic pipe, a single pipe with a convection boundary condition, two adiabatic pipes and two pipes with convection. The temperature of the air velocity inside the pipes, as well as the environment temperature, is assumed to vary with time in a senoidal form with an amplitude of 14 °C.

For the single adiabatic pipe model, simulations are performed using several different operational parameters and the results obtained are compared to those found in the literature. In order to improve the thermal exchange system, values, or a range of values, for the operational parameters are recommended. For the case with a 0,1 m diameter pipe, the following values are found: an air velocity inside the pipe of 4 m/s, a initial moisture content of the soil of 0,25, a length of pipe from 5 to 25 meters and a pipe center-to-center distance from 0,20 to 0,30 m.

The results shown that there is not a significant difference between the values of the volumetric storage energy in the soil obtained using a coupled resolution of the mass and energy equations and a single resolution of the energy equation. Even for the models with a convection boundary condition, with a single pipe or two pipes, the perceptual difference is negligibly.

The analysis of the temperature and moisture contents fields shown that during the day the soil absorbers heat from the air flux and, since there are regions of higher temperature near the pipes, the moisture migrates away from those regions. During the night, it is observed an opposite effect: the soil supplies heat to the air flux inside the pipes. For all situations analyzed in this work, the variation of the moisture content profiles with time is almost insignificant.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	01
1.1	Motivação.....	01
1.2	Objetivos	02
1.3	Estrutura geral do trabalho.....	02
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	04
3.	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	14
3.1	Apresentação do problema físico e dos modelos computacionais associados.....	14
3.2	Equações governantes.....	19
3.3	Condições de contorno para os modelos analisados.....	23
3.3.1	Condições de contorno para o modelo de um duto isolado.....	23
3.3.2	Condições de contorno para o modelo de um duto com convecção.....	27
3.3.3	Condições de contorno para o modelo de dois dutos isolados.....	28
3.3.4	Condições de contorno para o modelo de dois dutos com convecção.....	32
4.	METODOLOGIA DE SOLUÇÃO.....	34
4.1	Metodologia numérica.....	34
4.1.1	Acoplamento entre o escoamento interno e a temperatura superficial do duto.....	36
4.1.2	Acoplamento entre o escoamento interno de ar e o solo envolvente ao duto.....	38
4.1.3	Acoplamento da transferência simultânea de calor e umidade no solo.....	39
4.1.4	Análise de independência da malha.....	40
4.1.5	Validação da metodologia numérica.....	42
4.2	Análise da substituição de cabos de seção circular por cabos de seção transversal quadrada de área equivalente.....	44
4.2.1	Modelo do cabo de seção transversal quadrada.....	44
4.2.2	Resultados do modelo do cabo de seção transversal quadrada.....	49
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1	Seleção de valores recomendados para os parâmetros do modelo de um duto isolado....	53
5.1.1	Calor volumétrico armazenado em função da velocidade do escoamento.....	54
5.1.2	Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade.....	57
5.1.3	Calor volumétrico armazenado em função do comprimento do duto.....	61
5.1.4	Calor volumétrico armazenado em função da distância entre centros dos dutos.....	64
5.2	Combinações de parâmetros que produzem calores volumétricos equivalentes armazenados no solo.....	66

5.3	Comparação entre os calores volumétricos armazenados obtidos utilizando a resolução acoplada de calor e umidade e aqueles encontrados empregando a resolução da equação da energia.....	69
5.3.1	Calores volumétricos armazenados pelo modelo de um duto isolado.....	69
5.3.2	Comparação entre os calores volumétricos armazenados pelos diferentes modelos.....	74
5.4	Evoluções da temperatura e do conteúdo de umidade nos modelos analisados.....	76
5.4.1	Evoluções da temperatura e do conteúdo de umidade nos modelos de um duto isolado e de um duto com convecção.....	77
5.4.2	Evoluções da temperatura no modelo de dois dutos com convecção.....	87
5.5	Campos de temperatura e de umidade para algumas situações.....	91
5.5.1	Modelo de um duto isolado.....	92
5.5.2	Modelo de um duto com convecção.....	99
5.5.3	Modelo de dois dutos isolados.....	105
5.5.4	Modelo de dois dutos com convecção.....	109
6.	CONCLUSÕES.....	118
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124
	APÊNDICE I: MODELO FENOMENOLÓGICO DE PHILIP E DE VRIES.....	132
	APÊNDICE II: CONSTANTES E EXPRESSÕES DAS PROPRIEDADES VARIÁVEIS UTILIZADAS NO PRESENTE TRABALHO.....	138

LISTA DE SÍMBOLOS

a	conteúdo volumétrico de ar [m^3 de ar/ m^3]
C	capacidade calórica (ou volumétrica de calor) do solo [$\text{J}/\text{m}^3 \text{ K}$]
$C_{\alpha\alpha}$	fração da superfície sólida total do meio em contato mútuo partícula-a-partícula [-]
c_p	calor específico do ar a pressão constante [$\text{J}/\text{kg K}$]
D	diâmetro do duto [m]
d	distância entre centros dos dutos (lado externo do solo) [m]
D_{am}	difusividade molecular do vapor d'água no ar [m^2/s]
D_h	diâmetro hidráulico [m]
D_T	difusividade térmica total [$\text{m}^2/\text{s K}$]
D_{TV}	difusividade térmica do vapor [$\text{m}^2/\text{s K}$]
D_{Tl}	difusividade térmica do líquido [$\text{m}^2/\text{s K}$]
$D_{\theta v}$	difusividade isotérmica do vapor [m^2/s]
$D_{\theta l}$	difusividade isotérmica do líquido [m^2/s]
D_{θ}	difusividade isotérmica total [m^2/s]
D_{13}	difusividade molecular modificada do vapor d'água no ar [m^2/s]
f	fator de resistência à difusão [-]
f_{at}	fator de atrito [-]
g	aceleração da gravidade [m^2/s]
h_l	entalpia do líquido [J/kg]
h_v	entalpia de vaporização [J/kg]
h	coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$]; umidade relativa [-]
\bar{h}	coeficiente de transferência de calor por convecção médio [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$]
\vec{j}	fluxo mássico [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
K_{hid}	condutividade hidráulica do meio poroso insaturado [$\text{m}^3 \text{ s}/\text{kg}$]
K_{sat}	permeabilidade de saturação do solo [m^2]
k	condutividade térmica [$\text{W}/\text{m K}$]
\vec{k}	o vetor unitário com direção do eixo dos z [-]
k_e	condutividade térmica efetiva do solo quando não há fluxo de líquido ou vapor [$\text{W}/\text{m K}$]
k_{rl}	permeabilidade relativa do líquido [-]
L	comprimento do duto [m]; calor latente de vaporização d'água [J/kg]

l	lado do duto (lado interno do solo); lado do cabo de seção transversal quadrada [m]
\dot{m}	vazão mássica do escoamento [kg/s]
Nu	número de Nusselt [-]
P	perímetro da seção transversal do duto [m]; pressão total do sistema [Pa]
p	profundidade de aterramento dos cabos de potência e de seção transversal quadrada [m]
P_{ar}	ponto que representa o volume de controle do ar apresentado na Figura 5.17 [-]
P_{CP}	ponto na superfície do cabo de potência [-]
P_{CQ}	ponto na superfície do cabo de seção quadrada [-]
P_1	ponto que representa o primeiro volume de controle apresentado na Figura 5.17 [-]
P_2	ponto que representa o segundo volume de controle apresentado na Figura 5.17 [-]
P_3	ponto que representa o terceiro volume de controle apresentado na Figura 5.17 [-]
Q	calor armazenado no solo por m^3 durante um período [MJ/m ³]; potência dissipada nos cabos de seção circular e de seção transversal quadrada [W/m]
q	taxa de calor [W]
q'	fluxo de calor entre o solo e o ar por unidade de comprimento [W/m]
q''	fluxo de calor entre o solo e o ar por unidade de área [W/m ²]
Re	número de Reynolds [-]
R_c	raio do cabo de potência [m]
R_v	constante do vapor d'água [m ² /s ² K]
S	grau de saturação do solo [-]
S_e	grau de saturação efetiva do solo [-]
T	temperatura no instante atual [°C]
t	tempo [s]
T_0	temperatura no instante anterior [°C]
T_{ar}	temperatura do ar [°C]
T_p	temperatura no ponto em estudo [°C]
$T_m(z)$	temperatura média do ar na posição z [°C]
$T_{m,e}$	temperatura média do ar na entrada do duto [°C]
T_{sup}	temperatura superficial do duto (solo) [°C]
T_∞	temperatura do meio ambiente [°C]
u_m	velocidade média do ar no escoamento [m/s]
x	coordenada espacial [m]
XL	comprimento do domínio computacional do cabo de seção transversal quadrada na direção do eixo dos x [m]

<i>y</i>	coordenada espacial [m]
<i>YL</i>	comprimento do domínio computacional do cabo de seção transversal quadrada na direção do eixo dos <i>y</i> [m]
<i>YL1</i>	distância do cabo de seção transversal quadrada até a fronteira sul do domínio [m]
<i>z</i>	coordenada espacial [m]

SUPER-ÍNDICE

°	tempo anterior ou grau centígrado
'	por metro
"	por metro quadrado

SUB-ÍNDICE

<i>ar</i>	ar
<i>CP</i>	cabo de potência
<i>CQ</i>	cabo de seção transversal quadrada
<i>cr</i>	crítico
<i>E</i>	ponto leste
<i>e</i>	interface (fronteira) leste
<i>l</i>	líquido
<i>N</i>	ponto norte
<i>n</i>	interface (fronteira) norte
<i>P</i>	ponto em estudo
<i>S</i>	ponto sul
<i>s</i>	interface (fronteira) sul
<i>sat</i>	saturado
<i>sl</i>	sólido
<i>ss</i>	solo seco
<i>v</i>	vapor
<i>W</i>	ponto oeste
<i>w</i>	interface (fronteira) oeste
<i>o</i>	estado de referência

LETRAS GREGAS

α	fator de tortuosidade [-]
ε	porosidade do meio (solo) [-]
Φ	potencial total de umidade [m]
ϕ	potencial de umidade do solo [J/kg]
λ	condutividade térmica [W/m K]; condutividade térmica do meio poroso [W/m K]
μ	viscosidade dinâmica [N s/m ²]
ν	fator de fluxo de massa [-]
θ	conteúdo de umidade do solo [m ³ água/m ³ solo]
ρ	massa específica [kg/m ³]
σ	tensão superficial [N/m]
Ψ	potencial de sucção do solo [m]
ζ	fator de aumento da difusividade térmica do vapor [-]
$\vec{\nabla}$	operador nabla

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1	Sistema trocador-armazenador de calor no solo.....	15
Figura 3.2	Corte transversal de um arranjo infinito de dutos.....	15
Figura 3.3	Domínio computacional do modelo de um duto com seção transversal quadrada.....	16
Figura 3.4	Domínio do modelo computacional de um duto com convecção.....	17
Figura 3.5	Domínio do modelo computacional de dois dutos isolados.....	18
Figura 3.6	Domínio do modelo computacional de dois dutos com convecção.....	19
Figura 3.7	Domínio computacional do modelo de um duto isolado.....	24
Figura 3.8	Regiões da fronteira anterior do modelo de um duto isolado.....	25
Figura 3.9	Domínio computacional do modelo de um duto com convecção.....	27
Figura 3.10	Domínio computacional do modelo de dois dutos isolados.....	28
Figura 3.11	Regiões da fronteira anterior do modelo de dois dutos isolados.....	29
Figura 3.12	Domínio computacional do modelo de dois dutos com convecção.....	33
Figura 4.1	Variações da temperatura do ar na entrada do(s) duto(s).....	35
Figura 4.2	Região formada pela primeira camada de solo envolvente e um duto elementar	37
Figura 4.3	Esquema representativo de um volume de controle em duas dimensões.....	37
Figura 4.4	Volumes de solo adjacentes às interfaces ar-solo.....	38
Figura 4.5	Volumes de ar adjacentes às interfaces ar-solo.....	39
Figura 4.6	Arquivo da temperatura do ar na entrada do duto.....	43
Figura 4.7	Domínio físico dos cabos de potência e de seção transversal quadrada sobrepostos.....	45
Figura 4.8	Domínios computacionais dos cabos de potência e de seção transversal quadrada.....	46
Figura 4.9	Temperatura nos cabos de seção quadrada e de potência em função do tempo..	50
Figura 4.10	Temperatura em função do $\ln(x/\text{Raio})$ para $Q = 20 \text{ W/m}$	51
Figura 4.11	Conteúdo de umidade nos cabos de seção quadrada e de potência.....	51
Figura 4.12	Temperatura em função do $\ln(x/\text{Raio})$ para $Q = 80 \text{ W/m}$	52
Figura 4.13	Conteúdo de umidade em função do $\ln(x/\text{Raio})$ para $Q = 80 \text{ W/m}$	52
Figura 5.1	Calor volumétrico armazenado em função da velocidade de escoamento do ar para um comprimento de 5 m e diferentes distâncias entre centros.....	55
Figura 5.2	Calor volumétrico armazenado em função da velocidade de escoamento do ar para um comprimento de 10 m e diferentes distâncias entre centros.....	56

Figura 5.3	Calor volumétrico armazenado em função da velocidade de escoamento do ar para um comprimento de 20 m e diferentes distâncias entre centros.....	56
Figura 5.4	Calor volumétrico armazenado em função da velocidade de escoamento do ar para um comprimento de 30 m e diferentes distâncias entre centros.....	57
Figura 5.5	Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para um comprimento do duto de 5 m e várias distâncias entre centros.....	58
Figura 5.6	Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para um comprimento do duto de 10 m e várias distâncias entre centros.....	59
Figura 5.7	Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para um comprimento do duto de 20 m e várias distâncias entre centros.....	60
Figura 5.8	Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para um comprimento do duto de 30 m e várias distâncias entre centros.....	60
Figura 5.9	Calor volumétrico armazenado em função do comprimento do duto para um diâmetro de 0,1 m e várias distâncias entre centros.....	61
Figura 5.10	Calor volumétrico armazenado em função do comprimento do duto para um diâmetro de 0,15 m e várias distâncias entre centros.....	62
Figura 5.11	Calor volumétrico armazenado em função do comprimento do duto para um diâmetro de 0,2 m e várias distâncias entre centros.....	63
Figura 5.12	Calor volumétrico armazenado em função da distância entre centros dos dutos para diferentes diâmetros e comprimentos de 5, 10 e 20 m.....	64
Figura 5.13	Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para diferentes diâmetros, distâncias entre centros e comprimento de 2,5, 5 e 10 m.....	67
Figura 5.14	Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para diferentes diâmetros, distâncias entre centros e comprimento de 5, 10 e 20 m.....	68
Figura 5.15	Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para diferentes diâmetros, distâncias entre centros e comprimento de 10, 20 e 40 m.....	68
Figura 5.16	Calores volumétricos armazenados em função da amplitude da senóide.....	74
Figura 5.17	Localização dos pontos P_1 , P_2 e P_3 nos cortes transversais xy do duto.....	77
Figura 5.18	Variação temporal da temperatura nos pontos do corte transversal xy na metade do comprimento do modelo de um duto isolado.....	79
Figura 5.19	Variação temporal da umidade nos pontos do corte transversal xy na metade do comprimento do modelo de um duto isolado.....	79

Figura 5.20	Variação temporal da temperatura nos pontos do corte transversal xy na metade do comprimento do modelo de um duto com convecção.....	80
Figura 5.21	Variação temporal da umidade nos pontos do corte transversal xy na metade do comprimento do modelo de um duto com convecção.....	81
Figura 5.22	Variação temporal da temperatura nos pontos do corte transversal xy no modelo de um duto com convecção e utilizando uma senóide com amplitude de 50 °C.....	82
Figura 5.23	Variação temporal da umidade nos pontos do corte transversal xy no modelo de um duto com convecção e utilizando uma senóide com amplitude de 50 °C.	83
Figura 5.24	Variações da temperatura do solo em pontos ao longo da superfície do duto....	84
Figura 5.25	Variações da umidade do solo em pontos ao longo da superfície do duto.....	85
Figura 5.26	Curvas de variação da temperatura do escoamento em função da distância axial z do modelo de um duto isolado.....	86
Figura 5.27	Curvas de variação da temperatura do escoamento em função da distância axial z do modelo de um duto com convecção.....	87
Figura 5.28	Evolução da temperatura para um corte xy na metade do modelo de dois dutos com 5 metros de comprimento.....	89
Figura 5.29	Evolução da temperatura para um corte xy na metade do modelo de dois dutos com 20 metros de comprimento.....	90
Figura 5.30	Evolução da temperatura para um corte xy na saída do modelo de dois dutos com 20 metros de comprimento.....	90
Figura 5.31	Campo de temperatura às 2 horas para o modelo de um duto isolado.....	93
Figura 5.32	Campo de temperatura às 13 horas para o modelo de um duto isolado.....	93
Figura 5.33	Campo de temperatura às 7 horas para o modelo de um duto isolado.....	94
Figura 5.34	Campo de temperatura às 8 horas para o modelo de um duto isolado.....	94
Figura 5.35	Campo de temperatura às 9 horas para o modelo de um duto isolado.....	94
Figura 5.36	Campo de temperatura às 19 horas para o modelo de um duto isolado.....	94
Figura 5.37	Campo de temperatura às 20 horas para o modelo de um duto isolado.....	95
Figura 5.38	Campo de conteúdo de umidade às 2 horas para o modelo de um duto isolado	96
Figura 5.39	Campo de conteúdo de umidade às 13 horas para o modelo de um duto isolado	97
Figura 5.40	Campo de conteúdo de umidade às 7 horas para o modelo de um duto isolado	97
Figura 5.41	Campo de conteúdo de umidade às 8 horas para o modelo de um duto isolado	97
Figura 5.42	Campo de conteúdo de umidade às 9 horas para o modelo de um duto isolado	97
Figura 5.43	Campo de conteúdo de umidade às 19 horas para o modelo de um duto isolado	98
Figura 5.44	Campo de conteúdo de umidade às 20 horas para o modelo de um duto isolado	98

Figura 5.45	Campo de conteúdo de umidade às 21 horas para o modelo de um duto isolado	98
Figura 5.46	Campo de temperatura à 1 hora para o modelo de um duto com convecção.....	102
Figura 5.47	Campo de temperatura às 6 horas para o modelo de um duto com convecção...	102
Figura 5.48	Campo de temperatura às 7 horas para o modelo de um duto com convecção...	103
Figura 5.49	Campo de temperatura às 8 horas para o modelo de um duto com convecção...	103
Figura 5.50	Campo de temperatura às 9 horas para o modelo de um duto com convecção...	103
Figura 5.51	Campo de temperatura às 13 horas para o modelo de um duto com convecção	103
Figura 5.52	Campo de temperatura às 19 horas para o modelo de um duto com convecção	104
Figura 5.53	Campo de temperatura às 20 horas para o modelo de um duto com convecção	104
Figura 5.54	Campo de temperatura às 22 horas para o modelo de um duto com convecção	104
Figura 5.55	Campo de conteúdo de umidade à 1 hora para o modelo de um duto com convecção.....	105
Figura 5.56	Campo de temperatura às 2 horas para o modelo de dois dutos isolados.....	106
Figura 5.57	Campo de temperatura às 14 horas para o modelo de dois dutos isolados.....	107
Figura 5.58	Campo de temperatura às 7 horas para o modelo de dois dutos isolados.....	107
Figura 5.59	Campo de temperatura às 8 horas para o modelo de dois dutos isolados.....	107
Figura 5.60	Campo de temperatura às 9 horas para o modelo de dois dutos isolados.....	107
Figura 5.61	Campo de temperatura às 19 horas para o modelo de dois dutos isolados.....	108
Figura 5.62	Campo de temperatura às 20 horas para o modelo de dois dutos isolados.....	108
Figura 5.63	Campo de conteúdo de umidade às 2 horas para o modelo de dois dutos isolados.....	109
Figura 5.64	Campo de temperatura às 2 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	111
Figura 5.65	Campo de temperatura às 6 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	111
Figura 5.66	Campo de temperatura às 7 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	111
Figura 5.67	Campo de temperatura às 8 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	111
Figura 5.68	Campo de temperatura às 9 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	112
Figura 5.69	Campo de temperatura às 10 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	112
Figura 5.70	Campo de temperatura às 14 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	112

Figura 5.71	Campo de temperatura às 18 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	112
Figura 5.72	Campo de temperatura às 19 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	113
Figura 5.73	Campo de temperatura às 20 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	113
Figura 5.74	Campo de temperatura às 21 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	113
Figura 5.75	Campo de temperatura às 23 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	113
Figura 5.76	Campo de conteúdo de umidade às 2 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	114
Figura 5.77	Vista yz do campo de conteúdo de umidade às 2 horas.....	115
Figura 5.78	Campo de conteúdo de umidade às 6 horas para o modelo de dois dutos com convecção.....	115
Figura 5.79	Vista yz do campo de conteúdo de umidade às 6 horas.....	116
Figura 5.80	Campo de temperatura às 19 horas em um corte na saída do modelo.....	116
Figura 5.81	Vista yz do campo de temperatura às 19 horas em um corte na saída do modelo.....	117

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1	Refinamento da malha em xy do modelo de um duto isolado.....	41
Tabela 4.2	Refinamento da malha em z do modelo de um duto isolado.....	42
Tabela 4.3	Calor volumétrico armazenado no solo durante 24 horas.....	43
Tabela 5.1	Comparação entre os calores volumétricos armazenados no solo para a resolução acoplada do calor e umidade ou para a resolução de somente a equação da temperatura.....	71
Tabela 5.2	Comparação entre os calores volumétricos armazenados no solo para diferentes senóides usando a resolução acoplada do calor e umidade e de somente a equação da temperatura.....	73
Tabela 5.3	Comparação entre os calores volumétricos armazenados no solo para os diferentes modelos usando a resolução acoplada e de somente a equação da temperatura.....	75

1 INTRODUÇÃO

As freqüentes crises energéticas mundiais têm levado os governos a incentivar fortemente pesquisas relativas ao uso e/ou a um melhor aproveitamento de fontes alternativas de energia. Dentre estas fontes alternativas, destacam-se como aquelas que mais têm demandado pesquisas as energias eólica e solar. É nesta última fonte alternativa que se insere o chamado sistema trocador-armazenador de calor no solo, o qual pode ser utilizado como fonte complementar de aquecimento em muitas estufas solares agrícolas e, também, em qualquer outra atividade que necessite de aquecimento suplementar de um certo ambiente durante a noite. Este sistema trocador-armazenador de calor é composto, basicamente, por um feixe de dutos paralelos enterrados, sendo que o escoamento de ar dentro dos dutos realiza troca térmica com o solo envolvente. A transferência térmica entre o ar dos dutos e o solo influenciam-se mutuamente, indicando que há acoplamento entre os gradientes de temperatura destes dois elementos. O solo envolvente aos dutos é um meio poroso insaturado, caracterizado por espaços (poros) onde existe água, em diferentes estados físicos, e ar. Assim sendo, em resposta ao gradiente de temperatura produzido pelo escoamento interno, há transferência simultânea de calor e umidade no solo devido à ação combinada dos gradientes de temperatura e de umidade.

1.1 Motivação

A principal motivação da realização deste trabalho é resolver o problema do armazenamento de energia no solo dentro de estufas de plasticultura, levando em consideração a migração de umidade. A metodologia utilizada na solução deste problema poderá ser aplicada também na resolução de problemas semelhantes em várias áreas tecnológicas. Exemplos destas áreas incluem processos químicos de secagem e umidificação utilizados: nas engenharias de alimentos, petroquímica e química; na produção e exploração de petróleo e gás natural; em edificações; no estudo do conforto térmico; na utilização do solo como isolante ou dissipador de energia; em linhas de vapor ou cabos elétricos de potência aterrados; entre outros. Nestes casos, onde são empregados outros tipos de meios porosos, a metodologia de solução proposta pode ser implementada facilmente desde que estejam disponíveis as expressões para as propriedades do meio que compõe o problema em questão.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é resolver o problema transiente periódico e tridimensional da transferência simultânea de calor e umidade em solos insaturados envolvendo dutos enterrados, que compõem o sistema trocador-armazenador de calor, utilizando a simulação numérica.

Além do objetivo principal, este trabalho apresenta os seguintes objetivos secundários:

- melhorar o sistema de troca térmica dos modelos computacionais analisados, aumentando, assim, a eficiência destes modelos. Isto será feito testando diferentes valores para os parâmetros dos modelos, tais como: diâmetro, comprimento e distância entre centros dos dutos, velocidade do ar do escoamento interno e conteúdo de umidade do solo;

- quantificar, no processo de armazenagem de energia no solo, as parcelas de contribuição do calor transportado por condução pura e aquele transmitido por difusão, sendo que este último representa o calor transportado pelo líquido e vapor contidos nos poros do solo;

- investigar o campo de temperatura dos modelos computacionais analisados, pois a partir deste resultado será possível visualizar como as isotermas se desenvolvem, predominantemente, na direção radial dos dutos;

- analisar o campo de umidade dos modelos, pois este irá informar de maneira precisa como se desenvolvem as frentes de secagem no solo junto aos dutos durante seus sucessivos períodos de aquecimento e de resfriamento.

1.3 Estrutura geral do trabalho

Este trabalho é composto de seis capítulos, que são resumidamente descritos a seguir:

No Capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica que relaciona os principais trabalhos realizados sobre o assunto até o momento.

O Capítulo 3 apresenta o sistema trocador-armazenador de calor no solo juntamente com os quatro modelos computacionais associados, as equações governantes e as condições de contorno destes modelos.

No Capítulo 4 apresenta-se a metodologia numérica, onde são expostos os acoplamentos que compõem os modelos computacionais, a análise de independência da malha e a validação desta metodologia.

O Capítulo 5 apresenta e analisa os resultados obtidos para os quatro modelos computacionais estudados. Inicialmente, são apresentados os resultados da escolha dos valores recomendados para os parâmetros do modelo de um duto isolado, sendo também determinadas as combinações de valores dos parâmetros que produzem calor volumétrico equivalente armazenado no solo. Na seqüência, é realizada uma comparação entre os calores volumétricos armazenados pelo modelo de um duto isolado resultantes da resolução acoplada de energia e umidade e aqueles encontrados usando a resolução da equação da temperatura. No final deste capítulo são apresentadas as evoluções temporais e os campos de temperatura e de umidade para situações significativas dos modelos investigados.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões deste estudo, bem como sugestões para futuros trabalhos visando dar continuidade às pesquisas nesta área.

Uma observação importante que deve ser feita diz respeito à utilização, ao longo de todo o presente trabalho, do termo calor armazenado, em lugar do termo energia armazenada. Este último é efetivamente a expressão mais correta uma vez que o termo Calor se aplica a uma energia em trânsito (fluxo). No entanto, como o termo Calor é, na literatura da Transferência de Calor, amplamente utilizado para expressar energia gerada ou acumulada, optou-se por também utilizá-lo nestas formas no presente trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica que relaciona os principais trabalhos que envolvem o fenômeno da transferência simultânea de energia e massa em meios porosos não-saturados, assim como os casos que dizem respeito ao problema principal a ser estudado neste trabalho, ou seja, o transporte de calor e umidade no solo e a utilização deste como um meio armazenador de energia. Desta forma, a bibliografia a ser apresentada será dividida em duas partes, sendo que na primeira delas são relacionados os principais trabalhos na área do transporte simultâneo de calor e massa em meios porosos e, na segunda parte, os trabalhos que envolvem especificamente o transporte de calor e umidade no solo. A seguir, são detalhados os trabalhos referentes à primeira parte da revisão bibliográfica.

Foi Darcy, 1856, que iniciou o estudo do movimento de fluidos em meios porosos definindo a equação básica da migração de umidade para um meio poroso saturado. A consagrada Lei de Darcy utiliza o coeficiente denominado de condutividade hidráulica para relacionar o fluxo volumétrico de líquido com o gradiente da pressão hidrostática.

Buckingham, 1907, introduziu o conceito de potencial de sucção de um meio poroso através da verificação de que a pressão d'água em um meio poroso não-saturado é menor que a pressão atmosférica.

Haines, 1930, verificou que o potencial de sucção de um meio poroso é função da temperatura e da histerese, ou seja, do histórico de umidificação ou secagem do meio; é importante enfatizar que muitos autores, até então, ignoravam o efeito de histerese por não haver um estudo teórico capaz de explicar este comportamento.

Childs e Collis-George, 1950, concluíram que o potencial de sucção dependia somente do conteúdo de umidade e, conseqüentemente, a difusividade do líquido dependia somente desta variável. Utilizando este conceito no princípio da conservação de massa e considerando um regime transiente com ausência de gradientes térmicos, os autores encontraram a equação governante do movimento d'água em um meio poroso.

Sem dúvida, os trabalhos pioneiros que efetuaram a modelagem macroscópica da migração de umidade em meios porosos não-saturados foram realizados por Luikov, 1954, e por Philip e De Vries, 1957. Estes trabalhos utilizam as leis fenomenológicas da difusão de calor (Lei de Fourier) e de massa (Lei de Darcy para a fase líquida e Lei de Fick para a fase vapor) na obtenção das equações de balanço de energia e massa, respectivamente. Nestes dois modelos de transferência simultânea de energia e massa em meios porosos insaturados, pela primeira vez as influências dos gradientes de temperatura e umidade aparecem explicitamente nas equações

governantes. O modelo de Luikov, 1954, é idêntico ao de Philip e De Vries, 1957, sendo que este autor também encontra equações governantes que apresentam de forma separada as influências dos gradientes de temperatura e umidade no transporte de energia e massa. A única diferença entre as formulações de Luikov e de Philip e De Vries encontra-se na escolha da variável a ser utilizada na representação do conteúdo de umidade do meio. Enquanto Luikov utilizou a massa ponderada, que representa a razão entre a massa de líquido em relação à massa total, Philip e De Vries usaram o conteúdo volumétrico de umidade, definido como a razão entre o volume de líquido e o volume total incluindo os volumes de grãos e de vazios do meio poroso.

Em 1958, De Vries generalizou o modelo de 1957 dando atenção especial às mudanças do conteúdo de umidade nas fases líquida e vapor. Concluiu que a transferência de calor e massa é devida à ação conjunta de gravidade, dos gradientes de temperatura e do conteúdo de umidade. Neste mesmo trabalho, o autor analisou a interação existente entre o transporte de calor e massa em regime permanente. Em 1963, De Vries detalhou o transporte de calor em vários tipos de solos; este trabalho foi revisado em 1987.

Cary, 1963 e 1966, e Cary e Taylor, 1962a e 1962b, determinaram equações macroscópicas para a transferência de calor e massa utilizando coeficientes calculados experimentalmente para cada sistema específico. Para isso, partindo de uma fonte de entropia, os autores utilizaram o conceito de processos irreversíveis da termodinâmica para diferenciar os diversos tipos de fenômenos elementares irreversíveis do sistema.

Jury, 1973, realizou uma comparação entre os modelos de Philip e De Vries e de Cary e Taylor e, utilizando algumas das propriedades do primeiro modelo, apresentou vários resultados experimentais.

Luikov, 1975, realizou uma revisão dos principais trabalhos desenvolvidos por autores soviéticos na área de modelação matemática do transporte de calor e massa em meios porosos capilares.

Eckert e Faghri, 1980 e 1986, empregaram uma formulação paramétrica no modelo proposto por Philip e De Vries para analisar o fenômeno do transporte de energia e massa. Esta formulação foi validada, para uma classe específica de gradientes térmicos impostos ao meio e conteúdos iniciais de umidade, pelos trabalhos de Damasceno Ferreira, 1987, e Damasceno Ferreira e Prata, 1989 e 1990.

Crausse *et alli*, 1981, e Crausse, 1982, utilizando simulação numérica e resultados experimentais, verificaram a validade dos modelos de Luikov, 1954, e de Philip e De Vries, 1957, para toda a faixa de teores de umidade.

Nasrallah e Perre, 1988, a partir do trabalho de Whitaker, 1977, e levando em conta o efeito da pressão dos gases, determinaram um modelo de transferência de calor e massa em

meios porosos. Empregando tijolo e madeira, os autores realizaram um estudo teórico e unidimensional do transporte de calor e massa durante a secagem do meio considerado. Como resultados deste estudo foram determinadas as evoluções da temperatura, do conteúdo de umidade e da pressão.

Cunningham, 1992, empregando condições de contorno periódicas de umidade e temperatura, encontrou uma solução analítica estacionária aproximada para a equação da difusão de umidade, sendo que o fluxo de umidade desta solução é expresso através dos gradientes de temperatura e umidade.

Mendes *et alli*, 1996, empregando propriedades e condições de contorno variáveis para quatro tipos de materiais de construção - concreto aerado, argamassa, tijolo e madeira - realizaram uma análise numérica para avaliar os efeitos da simplificação de modelos dinâmicos de transferência simultânea de calor e massa.

Mendes, 1997, desenvolveu um código numérico que resolve as equações acopladas de transferência de calor e umidade, visando avaliar o efeito da umidade no comportamento térmico de ambientes construídos. Todos os estudos realizados, até o momento, consideram que o calor é transferido através das paredes de edificações puramente por condução e isto somente é verdade para o caso de materiais não-porosos. Entretanto, como a maioria dos materiais utilizados em construção civil é poroso, havendo no seu interior ar e água em suas diferentes fases, as paredes estão submetidas à ação simultânea dos gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade.

Peres, 1999, utiliza a simulação numérica, através do Método dos Volumes Finitos, para realizar um estudo do transporte de calor e umidade em paredes de edificações. Neste trabalho, através de um modelo de transporte simultâneo de calor e umidade em paredes de edificações, obtido a partir do modelo clássico de Philip e De Vries, 1957, é analisado o efeito da inclusão do transporte de umidade no processo de transferência de calor e por consequência nos valores dos fluxos térmicos.

Mendes *et alli*, 2002, desenvolveram uma nova metodologia matemática para resolver as equações acopladas de transferência de calor e massa em um meio poroso. A nova metodologia considera: (i) o vapor trocado pelas fronteiras do domínio o qual é definido em termos de temperatura e conteúdo de umidade e (ii) introdução de um novo algoritmo genérico para resolver, simultaneamente, as equações governantes para cada passo de tempo.

Mendes e Phillipi, 2005, propõem um método de previsão da transferência de calor e umidade através de paredes formadas por multicamadas, que é baseado nos gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade. Neste modelo, várias condições de contorno são testadas, sendo realizada uma análise detalhada das distribuições de temperatura e de conteúdo de

umidade e dos fluxos de calor sensível e latente, quando a discontinuidade nos perfis dos conteúdos de umidade são ou não incorporados no cálculo.

Conforme foi dito a segunda parte deste capítulo diz respeito aos trabalhos que envolvem particularmente o transporte simultâneo de calor e umidade no solo, que são detalhados a seguir.

Hartley, 1977 e 1987, Couvillion, 1981, e Hartley e Couvillion, 1986, utilizaram as propriedades difusivas do meio dependentes da temperatura e do conteúdo de umidade para analisar o fenômeno da transferência de calor e massa. Destas quatro publicações, Hartley, 1987, resume as três anteriores, sendo que nesta publicação o autor apresenta as propriedades difusivas do meio de forma similar àquela desenvolvida por Couvillion, 1981.

Abrams e Benton, 1980, analisaram o desempenho de um sistema composto por um duto enterrado no solo pelo qual circula um fluxo de ar quente. Assim, o fluxo de calor produzido pelo escoamento do ar no interior do duto é modelado levando em conta os três tipos de transferências de calor que existem no sistema: convectiva no escoamento, convecção e condução na superfície interna do duto e condução pura na sua parede.

Bharadwaj e Bansal, 1981, estudaram as variações diária e anual da distribuição de temperatura em solos sujeitos as diversas condições de superfícies, sendo estas condições de superfícies utilizadas decorrentes da combinação de superfície seca e úmida com ou sem incidência de luz solar. Os autores concluíram que a temperatura torna-se constante a uma profundidade de 0,15 e 4 metros para variações diária e anual, respectivamente.

Shah *et alli*, 1984, empregaram um modelo unidimensional para determinar experimentalmente os coeficientes de transporte de calor e massa em solos úmidos. No mesmo ano, Sibley e Raghavan, utilizando em seu experimento dutos de plástico corrugado de 10,2 e 15,2 centímetros de diâmetro, encontraram os coeficientes de transferência térmica de calor por convecção forçada considerando diferentes escoamentos e condições de contorno.

Schneider, 1985, analisou a perda de calor de um duto enterrado sob condições de contorno convectivas, seja na superfície do duto como na superfície do solo. Utilizando o Método de Elementos Finitos o autor determinou o campo de temperatura e o fluxo de calor transferido pelo sistema.

Boulard e Baille, 1986a e 1986b, empregaram o Método de Diferenças Finitas para analisar um sistema armazenador de calor em solo contendo dutos enterrados, sendo as condições de contorno transientes e medidas de forma experimental. Assim, quando a temperatura do sistema representado por uma estufa solar passiva ultrapassasse 25 °C, o excesso de calor retirado de seu interior seria transferido para o solo através de um trocador ar-água. Desta forma, os autores discutiram a influência das propriedades térmicas do solo e a geometria

dos dutos utilizados no sistema estudado.

Mavroyanopoulos e Kyritsis, 1986, analisaram um sistema trocador-armazenador de calor no solo composto por uma camada de vinte tubos de alumínio de 20 cm de diâmetro, 0,2 mm de espessura e de 15 m de comprimento, instalados a uma profundidade de 2 metros. Os autores concluíram que, durante o inverno, a energia requerida pelo ventilador que insufla ar para dentro dos tubos representa 20% da energia total recuperada do solo.

Hartley, 1987, apresentou e discutiu, de forma detalhada, as equações do transporte de energia e massa do modelo de Philip e De Vries. O autor também revisou os conceitos utilizados no estudo da transferência simultânea de calor e umidade, conceitos estes que foram aplicados no processo de secagem de solos úmidos.

Ewen, 1988 e 1990, concluiu que os solos que envolvem superfícies impermeáveis aquecidas possuem instabilidade térmica. Isto significa que existe uma temperatura crítica acima da qual o solo localizado junto à superfície aquecida, independente de sua forma, seca totalmente.

Bernier *et alli*, 1989a e 1989b, utilizando o balanço de energia analisaram experimentalmente o rendimento de um sistema trocador-armazenador de calor no solo formado por um feixe de dutos, dentro dos quais circula um fluxo de ar forçado. O modelo analisado possui as seguintes simplificações: o solo é considerado homogêneo, as propriedades físicas dele são consideradas constantes e apenas seu conteúdo de umidade pode afetar as propriedades térmicas. A diferença de temperatura mínima entre o ar e o solo para o funcionamento do sistema é de 2 °C.

Boulard *et alli*, 1989a e 1989b, efetuaram medições em um sistema armazenador de calor no solo, composto por dutos enterrados, o qual foi utilizado no sul da França, sendo que nos experimentos executados foi incluída a transferência de calor sensível e latente. No segundo trabalho, os autores simularam um modelo tridimensional de armazenamento de calor no solo. Este modelo inclui o transporte de calor sensível e latente, tanto no interior dos tubos como no solo envolvente e, para validá-lo, foram confrontados os resultados simulados com os obtidos nas medições experimentais obtendo boa concordância.

Kurata e Takakura, 1991a e 1991b, estudaram um sistema trocador-armazenador de calor no solo, com duas camadas de dutos enterrados no solo de uma estufa, sendo que pelo interior de uma das camadas circula ar e pela outra camada circula água que provém de coletores solares. Os autores construíram um modelo experimental em escala, o qual mostrou que, quando não é utilizada a circulação de ar, a energia recuperada do solo é igual à metade daquela quando o fluxo de ar é empregado. Uma simulação numérica foi realizada para o modelo experimental, na qual se inferiu que a energia elétrica empregada na circulação de ar e água é menor que a

energia diária recuperada do solo. Contudo, no balanço sazonal a energia elétrica consumida é maior que a recuperada do solo. Isto pode ser atribuído às perdas de calor ocorridas nas fronteiras do sistema, visto que este não foi isolado.

Sodha *et alli*, 1991, considerando um sistema de aquecimento-resfriamento de ambiente que utiliza dutos enterrados no solo, realizaram uma análise do rendimento térmico do sistema sujeito às variações dos parâmetros meteorológicos. Os autores efetuaram estudos utilizando diferentes combinações de parâmetros de funcionamento do sistema, tais como: solos secos e úmidos com ou sem irradiação solar, clima quente e seco, clima frio e seco e clima composto. Assim, para cada combinação analisada, Sodha *et alli* encontraram comprimentos ideais para os dutos, de forma a maximizar o potencial de aquecimento anual por unidade de comprimento.

Mihalakakou *et alli*, 1992, apresentaram um modelo simples e preciso que mede as variações diária e anual de temperatura do solo, que pode utilizar vários tipos de solos e realizar medições a diferentes profundidades. Este modelo foi validado através de medições experimentais realizadas em trocadores de calor no solo situados na cidade de Atenas.

Para avaliar o rendimento de sistemas trocadores-armazenadores de calor no solo compostos de dutos enterrados, Tzaferis *et alli*, 1992, desenvolveram oito algoritmos diferentes. Os autores analisaram a sensibilidade destes algoritmos em determinar o rendimento do sistema considerando a temperatura e a velocidade do ar na entrada nos dutos, assim como o raio, o comprimento e a profundidade em que os dutos estão enterrados.

Damasceno Ferreira, 1993, analisou a transferência de calor com migração de umidade nas adjacências de cabos elétricos de potência enterrados. Para descrever o fenômeno de transferência simultânea de calor e umidade, o modelo de Philip e De Vries, 1957, foi utilizado, sendo que todas as propriedades difusivas e termofísicas do solo são consideradas variáveis com a temperatura e o conteúdo de umidade. O Método dos Volumes Finitos foi utilizado para discretizar as equações governantes, sendo realizada uma transformação conforme no domínio do problema para poder empregar na sua resolução um sistema de coordenadas cartesianas. Na simulação numérica foram utilizados dois tipos de solos que são usados como material de reaterramento por empresas fabricantes de cabos de potência.

Sodha *et alli*, 1993, estudaram os efeitos das mudanças dos parâmetros de um sistema de dutos enterrados no potencial de resfriamento sazonal, sendo variados os parâmetros: comprimento e raio dos dutos e a vazão do ar dentro deles. Este estudo foi conduzido pelos autores na região de Jodhpur e Delhi, na Índia, considerando um clima quente e seco, típico destas regiões.

Baxter, 1994, analisou o potencial do solo situado a uma profundidade onde não há

mais influência das temperaturas superficiais como trocador-armazenador de calor. O autor realizou uma extensa análise dos parâmetros do sistema, tais como: níveis e gradientes de temperatura longitudinais e laterais do sistema duto-terra, condições psicométricas e a energia armazenada que foi trocada mensal e sazonalmente. Ainda, foram criados coeficientes de desempenho para avaliar a eficiência do sistema, o que permitiu concluir que tais sistemas podem ser utilizados com vantagens no resfriamento de estufas.

Trombe e Serres, 1994, apresentaram dois modelos numéricos simplificados que simulam um sistema trocador ar-terra. Os autores utilizaram o primeiro modelo para determinar a transferência de calor em regime transiente para paredes de uma edificação. O segundo modelo foi empregado para calcular a transferência de calor produzida por um escoamento de ar dentro de um duto enterrado no solo, sendo neste caso assumidas as seguintes simplificações: a troca térmica é calculada sob um regime estacionário, o solo mantém a temperatura constante durante a troca térmica, o ar do escoamento é considerado incompressível e as propriedades térmicas do solo são consideradas constantes.

Visando analisar o potencial anual de aquecimento e resfriamento de sistemas trocadores-armazenadores de calor no solo, compostos por dutos paralelos enterrados pelos quais circula um fluxo de ar, Sodha, *et alli*, 1994, realizaram um estudo do rendimento de tais sistemas. Objetivando melhorar a eficiência destes sistemas quando são utilizados em climas quentes e secos, como os que existem nas cidades de Jodhpur e Delhi, na Índia, os autores analisaram a variação de diferentes parâmetros de operação, tais como: temperatura ambiente e do solo, umidade do ar e do solo e radiação solar incidente no ambiente e na superfície do solo.

Mihalakakou *et alli*, 1994, realizaram um estudo experimental e numérico de desempenho de um sistema armazenador de calor no solo, composto por um duto enterrado e empregando coordenadas cilíndricas na solução do modelo transiente que avalia o transporte de calor e umidade.

Santamouris *et alli*, 1995, realizaram uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos sobre estufas solares. Os autores relataram o estudo de 95 estufas e investigaram cinco tipos de estufas solares passivas, de acordo com o sistema armazenador de calor utilizado, tais como: solo, água, leito de pedras e materiais com mudança de fase.

Mihalakakou *et alli*, 1995a, desenvolveram um algoritmo para analisar a influência dos parâmetros de um sistema trocador-armazenador de calor no solo. Dentre os parâmetros a serem avaliados encontram-se: raio e comprimento do duto, a velocidade do escoamento dentro do duto e a profundidade a que este se encontra enterrado no solo.

Mihalakakou *et alli*, 1995b, aperfeiçoaram o algoritmo anterior de maneira a poder empregá-lo como ferramenta de previsão para determinar as temperaturas do solo abaixo de

edificações e, conseqüentemente, o fluxo de calor entre o ambiente construído e o solo. As maiores dificuldades na obtenção do fluxo de calor são decorrentes da variação temporal da temperatura e do caráter tridimensional do ambiente construído e, principalmente, pelo elevado número de parâmetros geométricos envolvidos no modelo.

Freitas e Prata, 1996, desenvolveram uma metodologia numérica para analisar o comportamento térmico de cabos de potência aterrados que dissipam calor e, conseqüentemente, produzem uma migração de umidade nas suas vizinhanças.

Visando reduzir o consumo de energia empregada no aquecimento de estufas utilizadas em plasticultura, Gauthier *et alli*, 1997, desenvolveram um modelo numérico para analisar o comportamento de um sistema trocador-armazenador de calor no solo composto por duas camadas de dutos enterrados pelos quais circula um fluxo de ar retirado do ambiente interno da estufa. O modelo numérico de transferência de calor transiente e tridimensional, proposto pelos autores, utiliza o Método das Diferenças Finitas para discretizar as equações acopladas de conservação de energia para o solo e para o escoamento de ar dentro dos tubos. Neste trabalho foi realizado um amplo estudo de desempenho do sistema quando modificados os parâmetros como: diâmetro e comprimento dos dutos, velocidade do fluxo de ar e o conteúdo de umidade deste fluxo. Os resultados decorrentes das várias simulações numéricas realizadas foram validados através de dados experimentais obtidos de um sistema trocador-armazenador de calor comercial.

Marczak e Sebben, 1998, estudaram o processo da migração da umidade em cabos de potência aterrados com dois tipos de solos, um natural e outro artificial.

Thomas *et alli*, 1998, desenvolveram um modelo numérico tridimensional para resolver a transferência acoplada de calor e umidade em solos não-saturados. Este modelo inclui a transferência de umidade nas formas líquida e vapor e a transferência de calor, por condução, por convecção e pelo calor latente de vaporização. Na discretização das equações governantes foi utilizado o Método dos Elementos Finitos. O problema físico considerado inclui as propriedades hidráulicas não-lineares do solo.

Chung *et alli*, 1999, encontraram uma solução semi-analítica para o problema de transferência de calor de um duto enterrado com temperatura constante na sua parede, para um meio sólido semi-infinito com uma superfície plana exposta ao escoamento de um fluido. Os autores realizaram, também, uma investigação da taxa total de transferência de calor do duto para o solo.

Baseados em uma extensa monitoração e trabalhos de simulação, Hollmuller e Lachal, 2001, examinaram a diferença fundamental entre o potencial de pré-aquecimento no inverno e de resfriamento no verão de um sistema de dutos enterrados para o clima da Europa

Central. Os balanços de energia foram calculados levando em consideração as trocas de calor sensível e latente, assim como a difusão de calor no solo.

Utilizando o Método dos Volumes Finitos, para discretizar as equações acopladas de conservação de energia para o solo e para o escoamento de ar dentro dos dutos de um sistema trocador-armazenador de calor, Garcia, 2001, desenvolveu um modelo numérico que reproduziu um dos resultados obtidos por Gauthier *et alli*, 1997. O modelo transiente e tridimensional de Garcia alega resolver o acoplamento de calor entre o escoamento de ar e o solo ao redor dos dutos, mas não considera a migração de umidade do solo envolvente aos dutos e, conseqüentemente, não resolve o transporte simultâneo de calor e umidade que há no solo do sistema trocador-armazenador de calor.

Santander e Bubnovich, 2002, examinaram, por meio da metodologia numérica dos Volumes Finitos e de experimentos, os mecanismos da migração de umidade e dissipação térmica no solo. O estudo é fundamentado no modelo fenomenológico de Philip et De Vries, 1957, para uma fonte térmica inserida em dois solos com características diferentes.

Garrido *et alli*, 2003, calcularam a distribuição de temperatura para um sistema composto por três cabos de potência aterrados. Os autores usaram coordenadas cilíndricas no domínio que representa os cabos e utilizaram coordenadas cartesianas no domínio que representa o solo.

Janssen *et alli*, 2004, investigaram a influência da transferência de umidade na parcela de calor perdido em edificações via subsolo, sendo comparadas simulações que resolvem de forma acoplada o calor e a umidade e simulações com a resolução da equação da temperatura. Conforme os autores, foram observadas diferenças significativas entre estas simulações.

Kurpaska *et alli*, 2004, utilizaram a teoria descrita por Luikov *et alli*, 1974, para apresentar um modelo matemático empregado na simulação da transferência de calor e umidade que ocorre no subsolo de estufas em plasticultura, onde utiliza-se um sistema de aquecimento composto por dutos enterrados. Neste modelo, a quantidade de água consumida pelas raízes das plantas cultivadas na estufa é calculada como sendo um modelo de transpiração, a qual é inserida no termo fonte da equação da difusão.

Xinguo *et alli*, 2005, desenvolveram um modelo físico que implementa a transferência de calor e umidade no solo envolvente de uma fonte interna de calor composta por um trocador de calor subterrâneo, sendo incorporados os cálculos de fatores tais como propriedades dos diferentes tipos de solos e movimentos da umidade nestes solos. No modelo, o trocador de calor não é tratado como uma condição de contorno, mas como o termo que representa a fonte interna de calor na equação da energia.

Conforme pode ser observado nesta revisão, há vários trabalhos que tratam do

problema da transferência simultânea de calor e umidade em solos. No entanto, nenhum deles resolve este problema para uma geometria tri-dimensional, considerando as propriedades difusivas e termofísicas do ar e do solo variáveis com a temperatura e com o conteúdo de umidade; desta forma, a metodologia proposta neste trabalho tem caráter inovador.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Este capítulo apresenta a formulação do problema transiente periódico e tridimensional da transferência simultânea de calor e umidade em solos não-saturados envolventes de dutos enterrados, que ocorre em um sistema trocador-armazenador de calor no solo. A análise deste processo de transferência é realizada através do modelo clássico de Philip e De Vries, 1957. Neste modelo, as leis fenomenológicas da difusão de calor (Lei de Fourier) e massa (Lei de Darcy para a fase líquida e Lei de Fick para a fase vapor) são utilizadas nas equações de conservação de energia e de massa. Como resultado, tem-se explicitamente as influências combinadas dos gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade nos processos de transporte de calor e massa, através das difusividades associadas a estes gradientes.

A seguir, são apresentados o problema físico representado pelo sistema trocador-armazenador de calor no solo, os quatro modelos computacionais associados a este problema, as equações governantes e as correspondentes condições de contorno para cada um destes modelos.

3.1 Apresentação do problema físico e dos modelos computacionais associados

O presente estudo tem por objetivo investigar o fenômeno da transferência simultânea de calor e umidade que ocorrem no problema físico composto pelo denominado sistema trocador-armazenador de calor no solo – em inglês “*Soil Heat Exchanger-Storage System - (SHESS)*” –. Este sistema, que foi utilizado por Gauthier *et alli*, 1997, é formado por uma estufa solar que em seu interior possui um feixe de dutos paralelos enterrados, conforme apresenta a Figura 3.1.

O funcionamento do sistema trocador-armazenador de calor no solo é dividido em duas etapas; a primeira contém o armazenamento de energia no solo envolvente aos dutos, sendo esta etapa realizada durante o dia. Em contraste, a segunda etapa, realizada durante a noite, corresponde à recuperação de parte da energia calórica armazenada no solo interno da estufa solar. Durante o dia, o ar quente, da parte superior do interior da estufa, é bombeado para dentro do feixe de dutos que devolvem o ar mais frio, com temperatura inferior à temperatura de entrada, uma vez que o escoamento interno de ar efetuou troca térmica com o solo envolvente que estava a uma temperatura mais baixa. Durante a noite, ocorre o inverso: o ar mais frio do interior da estufa, captado na extremidade próxima à superfície do solo, é bombeado para dentro dos dutos, que devolvem o ar em temperatura superior à de entrada, já que o solo encontra-se a uma temperatura mais elevada do que a temperatura do ar interno da estufa.

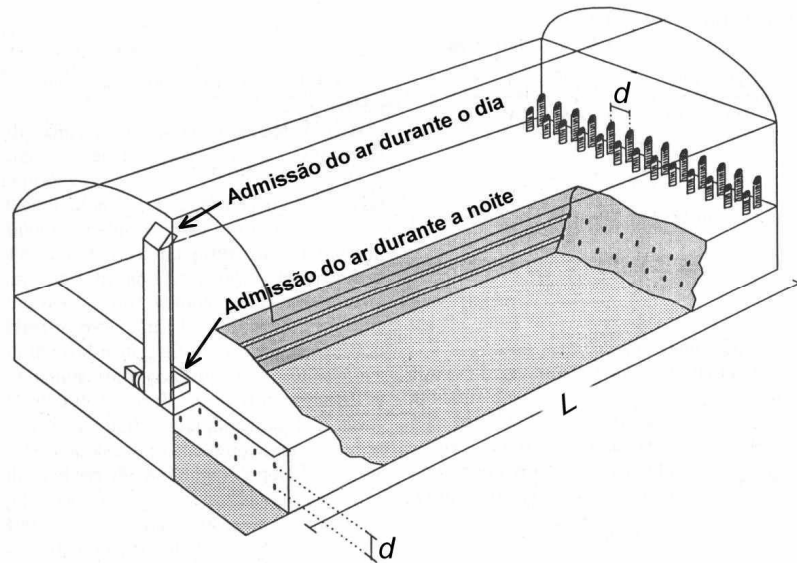


Figura 3.1 - Sistema trocador-armazenador de calor no solo - Fonte: Gauthier *et alli*, 1997

A Figura 3.2 representa um corte transversal, no plano xy , do feixe de dutos de um sistema trocador-armazenador de calor composto por um arranjo infinito de tubos com um mesmo diâmetro D , sendo d a distância entre centros destes dutos. Usando simetria, a análise do problema físico deste sistema, formado por um arranjo infinito de tubos, fica reduzida ao estudo de um único duto. As regiões de solo, separadas pelas linhas pontilhadas, têm forma quadrada cujo lado corresponde à distância entre os centros dos dutos. Assim sendo, a análise do sistema trocador-armazenador de calor, a partir deste momento, será realizada somente em uma região do solo de forma paralelepípeda, cuja seção transversal, no plano xy , é quadrada de lado d , onde a região do solo que representa a referida seção transversal é destacada em negrito na Figura 3.2.

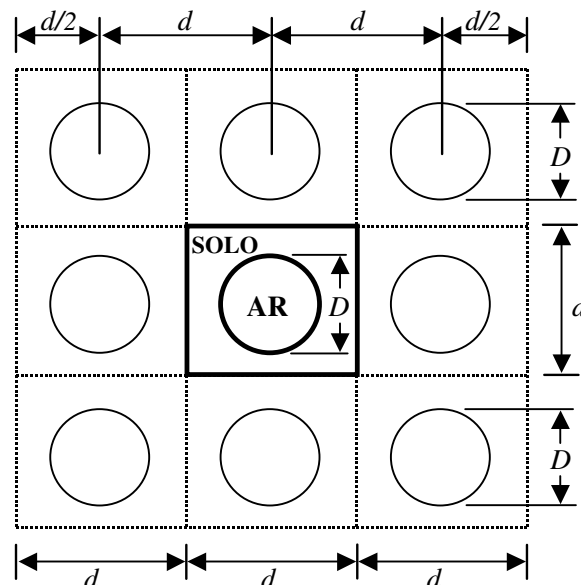


Figura 3.2 – Corte transversal de um arranjo infinito de dutos

Considerando a proposta de Gauthier *et alli*, 1997, de substituir dutos de seção transversal circular por dutos de seção transversal quadrada de área equivalente, tem-se que o problema composto por uma região do solo de forma paralelepípeda, mostrado pela Figura 3.2, resulta no modelo computacional de um duto com seção transversal quadrada, apresentado pela Figura 3.3. O comprimento deste modelo é dado por L , sendo o lado do duto, l , obtido igualando-se as áreas dos dutos de seções transversais circulares (de diâmetro D) e quadrada (de lado l). Assim, para um tubo circular de diâmetro, D , o lado do duto, de seção transversal quadrada de área equivalente, é dado pela expressão:

$$l = \frac{\sqrt{\pi}}{2} D \quad (3.1)$$

No próximo capítulo, na comparação entre os modelos de um cabo de seção transversal quadrada e um cabo de potência, apresentado por Damasceno Ferreira, 1993, será analisada a substituição de cabos de seção transversal circular por cabos de seção transversal quadrada de área equivalente.

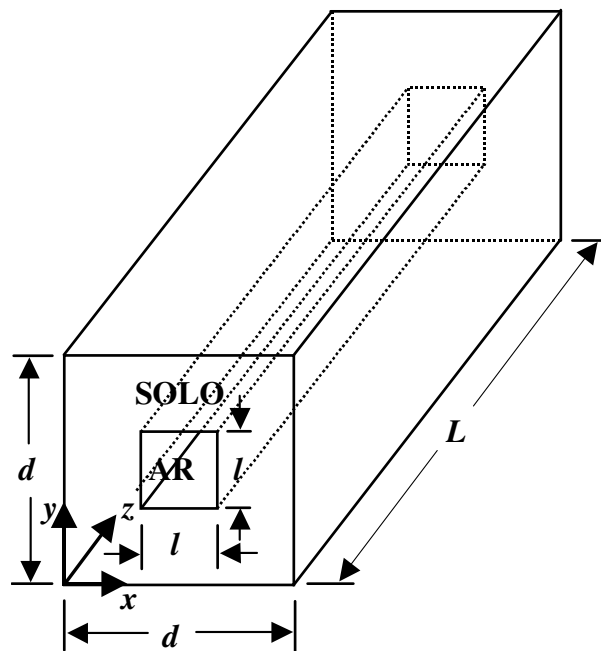


Figura 3.3 – Domínio computacional do modelo de um duto com seção transversal quadrada

Como a modelagem numérica em três dimensões do domínio real do problema físico composto pelo sistema trocador-armazenador de calor no solo, apresentado pela Figura 3.1, é de difícil execução utilizando coordenadas cartesianas, optou-se por utilizar a substituição proposta

por Gauthier *et alli*, 1997, de modelar dutos de seção transversal circular como dutos de seção transversal quadrada de área equivalente. Além disso, neste trabalho são analisados quatro modelos computacionais associados ao problema físico anterior, sendo que todos os domínios destes modelos são obtidos utilizando-se simetria em um sistema trocador-armazenador de calor no solo composto por um arranjo infinito de dutos.

O primeiro modelo computacional a ser analisado é modelo de um duto isolado. Este modelo, cujo domínio computacional corresponde ao apresentado pela Figura 3.3, possui isolamento térmico e impermeabilidade à passagem de umidade em todas as faces externas, visto que este domínio foi obtido utilizando-se simetria em um sistema trocador-armazenador de calor no solo composto por um arranjo infinito de dutos.

É importante ressaltar que a situação real onde tem-se um sistema trocador-armazenador de calor no solo composto por uma única camada de dutos compreende transferência de calor por convecção, radiação e evaporação. No entanto, para fins de simplificação, apenas o efeito convectivo será considerado. Assim, o problema pode ser aproximado pela situação composta pela camada superior do arranjo infinito de dutos, que efetua troca térmica com o meio ambiente, e levando em conta a simetria deste arranjo, tem-se um domínio computacional composto por um duto com uma condição convectiva na sua face superior. Este domínio define o segundo modelo computacional a ser estudado, que é denominado de modelo de um duto com convecção, conforme apresenta a Figura 3.4, onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção e T_∞ é a temperatura do meio ambiente.

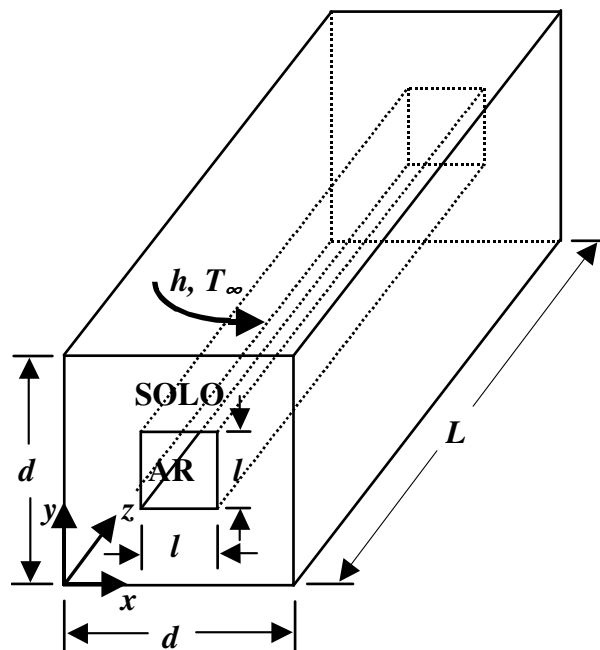


Figura 3.4 – Domínio do modelo computacional de um duto com convecção

O terceiro modelo computacional a ser analisado, corresponde a uma extensão do primeiro modelo, onde são considerados dois dutos sobrepostos. Assim, o denominado modelo de dois dutos isolados possui um domínio computacional formado por dois dutos superpostos, que também apresenta isolamento térmico e impermeabilidade à passagem de umidade em todas as faces externas, como mostra a Figura 3.5.

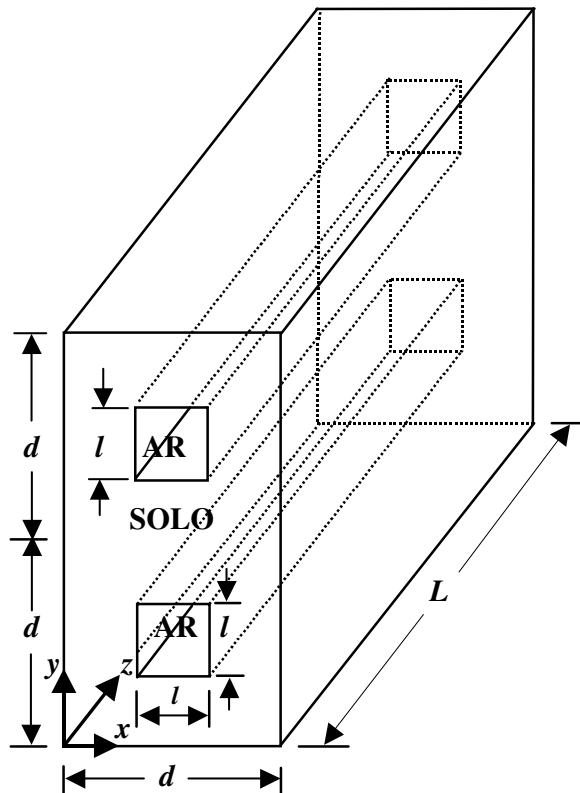


Figura 3.5 – Domínio do modelo computacional de dois dutos isolados

Analogamente à determinação do segundo modelo computacional, é definido o quarto modelo a ser avaliado, o qual considera um sistema trocador-armazenador de calor no solo composto por duas camadas de dutos. Empregando simetria e considerando que este sistema pode ser aproximado por um sistema formado pelas duas camadas superiores do arranjo infinito de dutos, tem-se o domínio computacional deste modelo, conforme apresenta a Figura 3.6. É este domínio computacional formado por dois dutos superpostos, onde o duto localizado acima possui na sua face superior uma condição convectiva com o meio ambiente, que dá origem ao denominado modelo de dois dutos com convecção. Neste quarto modelo computacional, como no segundo, também serão desprezados os efeitos da radiação e da evaporação.

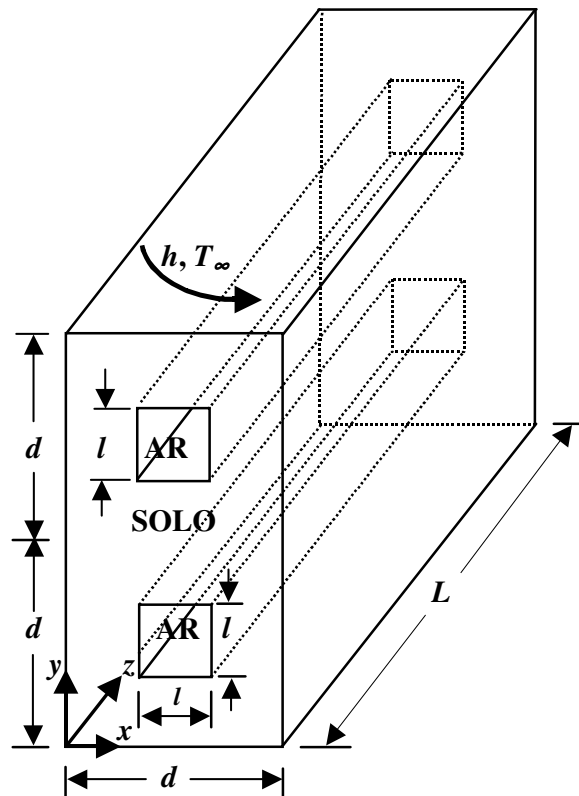


Figura 3.6 – Domínio do modelo computacional de dois dutos com convecção

A seguir, são apresentadas as equações governantes definidas para o problema da transferência simultânea de energia e massa em meios porosos insaturados, propostas por Philip e De Vries, 1957, e a equação que realiza o acoplamento entre o escoamento interno de ar com a temperatura superficial dos dutos, que serão empregadas nas resoluções dos quatro modelos computacionais investigados.

3.2 – Equações governantes

Como foi visto na revisão bibliográfica, as formulações pioneiras que conseguiram equacionar satisfatoriamente o problema da transferência simultânea de energia e massa em meios porosos não-saturados foram as apresentadas por Luikov, 1954, e por Philip e De Vries, 1957. Na obtenção das equações diferenciais governantes do problema em questão, são assumidas as seguintes hipóteses simplificativas:

- a fase sólida é uma matriz fixa;
- o solo é isotrópico;
- a massa de vapor d'água presente nos poros é negligenciável comparada à massa do

líquido;

-o vapor e o ar contidos nos poros comportam-se como gás ideal;

-é desprezado o efeito da presença de soluto na água;

-a resistência térmica na parede do duto é desprezível;

-assume-se que o escoamento do ar dentro do comprimento avaliado do duto seja completamente desenvolvido e que, conseqüentemente, não sofre a ação do comprimento de entrada do duto.

As equações governantes do problema físico da transferência simultânea de calor e umidade em solos insaturados utilizadas nos modelos computacionais investigados, são aquelas propostas por Hartley, 1987. A obtenção das expressões destas equações governantes, assim como as expressões das difusividades térmica e isotérmica associadas ao problema em questão são apresentadas no Apêndice I no Modelo Fenomenológico de Philip e De Vries.

A equação vetorial do transporte de energia em um meio poroso não-saturado, é dada por:

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left[(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \vec{\nabla} T + \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \vec{\nabla} \theta \right] \quad (3.2)$$

onde T é a temperatura, t é o tempo, θ é o conteúdo volumétrico de umidade, C é a capacidade calorífica (ou volumétrica de calor) do solo, que segundo De Vries, 1975, contém uma contribuição ponderada da capacidade calorífica das diversas fases, k_e é a condutividade térmica efetiva para o caso de não existir fluxo de líquido ou vapor, ρ_l é a massa específica do líquido, h_{lv} é a entalpia de vaporização, D_{TV} é a difusividade térmica do vapor e $D_{\theta V}$ é a difusividade isotérmica do vapor. Ainda, toda a expressão $(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV})$ é denominada de condutividade térmica do meio poroso, a qual inclui as contribuições da difusão térmica e do transporte de energia devido à migração do vapor.

A equação vetorial do transporte de massa, desconsiderando a parcela correspondente à ação da gravidade, é expressa por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left[D_T \vec{\nabla} T + D_\theta \vec{\nabla} \theta \right] \quad (3.3)$$

onde D_T e D_θ são, respectivamente, as difusividades térmica e isotérmica totais, sendo que elas

são definidas por:

$$D_T = D_{Tl} + D_{TV} \quad \text{e} \quad D_\theta = D_{\theta l} + D_{\theta V} \quad (3.4)$$

onde D_{Tl} a difusividade térmica do líquido e $D_{\theta l}$ é a difusividade isotérmica do líquido.

Em coordenadas cartesianas as equações (3.2) e (3.3) se transformam, respectivamente, em:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(CT)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial y} + \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial z} + \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_T \frac{\partial T}{\partial x} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_T \frac{\partial T}{\partial y} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_T \frac{\partial T}{\partial z} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \quad (3.6)$$

Ao invés de resolver o escoamento do ar dentro do duto de seção transversal quadrada e, conseqüentemente, determinar as diferentes temperaturas ao longo dele, optou-se por utilizar a equação que permite calcular a temperatura do escoamento em qualquer posição do duto a partir da temperatura média na entrada deste duto. Esta equação, obtida através de um balanço de energia em um duto com temperatura superficial constante, é dada por:

$$\frac{T_{sup} - T_m(z)}{T_{sup} - T_{m,e}} = \exp\left(-\frac{P \bar{h}}{\dot{m} c_p} z\right) \quad (3.7)$$

onde T_{sup} é a temperatura superficial do duto (neste caso, representado pelo solo), $T_{m,e}$ é temperatura média do ar na entrada do duto, $T_m(z)$ é temperatura média do ar na posição z , medida a partir da entrada do duto, P é o perímetro do duto, c_p é o calor específico do ar a pressão constante, \bar{h} é o coeficiente de transferência de calor por convecção médio e \dot{m} vazão mássica do escoamento.

Considerando um modelo computacional composto por um fluxo de ar que escoar dentro de um duto de seção transversal quadrada, de lado l , e substituindo o perímetro, P , e a vazão mássica, \dot{m} , em (3.7), obtém-se uma equação que permite calcular a temperatura média do escoamento de ar em qualquer posição do duto, a qual é expressa por:

$$T_m(z) = T_{sup} + (T_{m,e} - T_{sup}) \exp\left(-\frac{4\bar{h}}{u_m l \rho_{ar} c_p} z\right) \quad (3.8)$$

onde ρ_{ar} é a densidade do ar e u_m é a velocidade média do ar no escoamento.

É importante salientar que, para compensar esta substituição do duto de seção transversal circular por um duto de seção transversal quadrada, o coeficiente de transferência de calor por convecção médio, \bar{h} , da equação (3.8) deve ser multiplicado pelo fator $\sqrt{\pi}/2$. Este fator, que representa a razão entre o perímetro do tubo de seção transversal circular e o perímetro do duto de seção transversal quadrada, é o mesmo que multiplica o diâmetro do duto, D , na equação (3.1). Com o propósito de simplificar a notação, a partir de agora o coeficiente de transferência de calor por convecção médio será representado simplesmente por h .

Para determinar a evolução da temperatura do escoamento interno ao longo do comprimento L do modelo computacional em questão, este é dividido em fatias de espessura Δz . Cada uma destas fatias, obtidas na partição do comprimento L do duto, podem ser consideradas como dutos elementares com temperatura superficial constante e de pequenos comprimentos. Sendo assim, dada a temperatura média do fluido (ar) na entrada de um destes dutos elementares, pode-se determinar a temperatura média em qualquer posição dele, inclusive na saída deste duto. Se o processo for repetido, ou seja, a temperatura na saída do duto elementar anterior passa a ser igual à temperatura na entrada do posterior, pode-se obter as temperaturas ao longo do comprimento L do duto, que são necessárias para realizar o acoplamento com o conteúdo de umidade e a temperatura do solo do domínio computacional do modelo considerado.

Para o cálculo do coeficiente convectivo, h , do escoamento interno, utiliza-se o número de Nusselt, Nu_{D_h} , baseado no diâmetro hidráulico D_h . Para as velocidades do escoamento usadas nas simulações, dos diferentes casos analisados, tem-se valores de número de Reynolds muito acima de 3000; assim, para este cálculo foram assumidos escoamentos turbulentos completamente desenvolvidos (fluidodinâmica e termicamente). Esta última hipótese, é justificada pela distância que o ar do escoamento percorre desde a admissão até o local onde se localiza propriamente o início do comprimento L do duto do modelo computacional em questão. Dentre as expressões mais utilizadas para a determinação do número de Nusselt, escolheu-se a correlação que possui as seguintes características: fornece menor erro para escoamentos caracterizados por grandes variações das propriedades e maiores faixas de validação para os números de Prandtl, Pr , e Reynolds, Re_{D_h} , para um diâmetro hidráulico D_h . Segundo Gnielinski, V., 1976, *Apud* Incropera e DeWitt, 1998, uma correlação, com erro reduzido a menos de 10% e válida para $3000 < Re_{D_h} < 5 \times 10^6$ e $0,5 < Pr < 2000$, é dada por:

$$Nu_{D_h} = \frac{(f_{at}/8)(Re_{D_h} - 1000)Pr}{1 + 12,7(f_{at}/8)^{0,5}\left(Pr^{2/3} - 1\right)} \quad (3.9)$$

onde f_{at} é o fator de atrito. Segundo Petukhov, B. S., 1970, *Apud* Incropera et DeWitt, 1998, a expressão do fator de atrito para tubos lisos, válida para a maior faixa de valores de Reynolds ($3000 < Re_{D_h} < 5 \times 10^6$), é dada pela equação:

$$f_{at} = \left(0,79 \ln(Re_{D_h}) - 1,64\right)^{-2} \quad (3.10)$$

Finalmente, empregando o número de Nusselt, Nu_{D_h} , determinado pela equação (3.9), a condutividade térmica do ar, k_{ar} , e o diâmetro hidráulico, D_h , obtém-se o coeficiente de transferência de calor por convecção, h , associado ao escoamento interno.

As expressões (3.5) e (3.6), que equacionam o fenômeno do transporte simultâneo de calor e umidade, e a expressão (3.8), que permite calcular a temperatura média do escoamento em qualquer posição do duto, são empregadas na resolução dos quatro modelos computacionais analisados neste trabalho.

3.3 Condições de contorno para os modelos analisados

Visto que neste trabalho são explorados quatro modelos computacionais diferentes, as correspondentes condições de contorno de temperatura e de umidade para cada um destes modelos, são apresentadas separadamente.

3.3.1 Condições de contorno para o modelo de um duto isolado

O domínio computacional do modelo de um duto isolado, descrito anteriormente, é apresentado pela Figura 3.7, onde d representa o lado externo do solo, l o lado do duto (ou lado interno do solo) e L o seu comprimento. Todas as faces externas deste modelo, além de serem isoladas termicamente, são impermeáveis à passagem de umidade. Também são impermeáveis à passagem de umidade as faces internas do modelo, as quais representam às faces do duto.

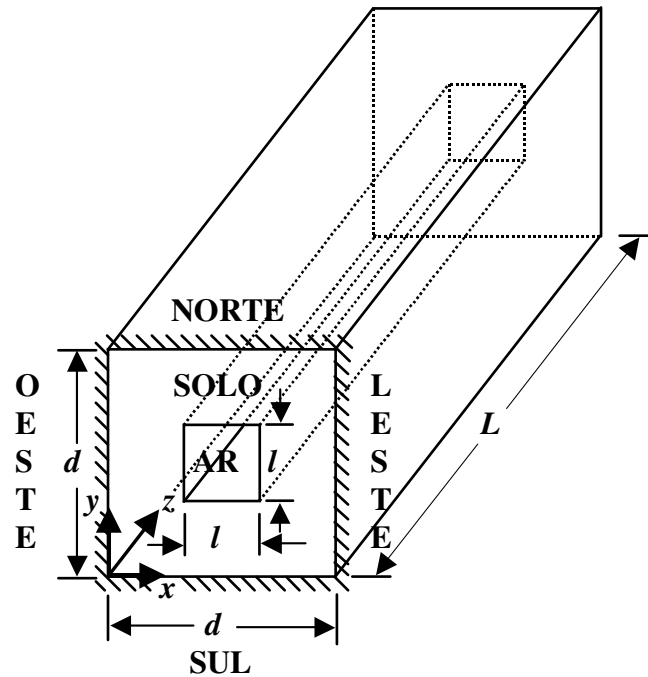


Figura 3.7 – Domínio computacional do modelo de um duto isolado

A seguir, são descritas as condições de contorno empregadas neste modelo computacional:

a) Para a temperatura:

- 1) a temperatura inicial de todo o meio poroso (solo) é de 20 °C;
- 2) a fronteira norte do domínio (solo) é isolada, para $y = d$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial y} = 0$;
- 3) a fronteira sul do domínio (solo) é isolada, para $y = 0$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial y} = 0$;
- 4) a fronteira leste do domínio (solo) é isolada, para $x = d$, $0 \leq y \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = 0$;
- 5) a fronteira oeste do domínio (solo) é isolada, para $x = 0$, $0 \leq y \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = 0$;
- 6) assumindo que a fronteira anterior do domínio (solo) é isolada, exceto para o quadrado central de lado l , no qual aplica-se uma variação periódica de temperatura. Considerando a retirada do quadrado central, a apresentação da condição de contorno na fronteira anterior fica mais clara se esta fronteira for dividida em quatro regiões, conforme apresenta a Figura 3.8. Assim, as condições de contorno correspondentes às quatro regiões da fronteira anterior do domínio são:

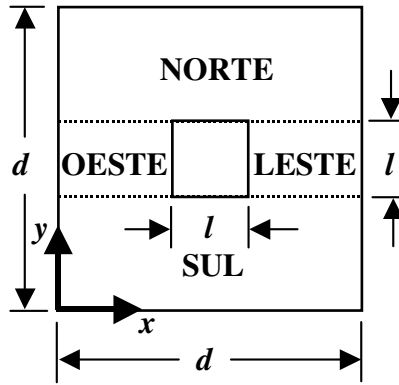


Figura 3.8 – Regiões da fronteira anterior do modelo de um duto isolado

-na região sul, para $z = 0$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq y \leq \frac{d-l}{2} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

-na região oeste, para $z = 0$, $0 \leq x \leq \frac{d-l}{2}$ e $\frac{d-l}{2} \leq y \leq \frac{d-l}{2} + l \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

-na região leste, para $z = 0$, $\frac{d-l}{2} + l \leq x \leq d$ e $\frac{d-l}{2} \leq y \leq \frac{d-l}{2} + l \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

-na região norte, para $z = 0$, $0 \leq x \leq d$ e $\frac{d-l}{2} + l \leq y \leq d \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

7) assumindo que a fronteira posterior do domínio (solo) é toda isolada, logo a condição de contorno é dada:

para $z = L$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq y \leq d \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

8) há fluxo de calor na fronteira norte do duto, para $y = \frac{d-l}{2} + l$, $\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l$ e

$$0 \leq z \leq L \Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_s = q'';$$

9) há fluxo de calor na fronteira sul do duto, para $y = \frac{d-l}{2}$, $\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow$

$$-(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_n = -q'';$$

10) há fluxo de calor na fronteira leste do duto, para $x = \frac{d-l}{2} + l$, $\frac{d-l}{2} \leq y \leq \frac{d-l}{2} + l$ e

$$0 \leq z \leq L \Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_w = q'';$$

11) há fluxo de calor na fronteira oeste do duto, para $x = \frac{d-l}{2}$, $\frac{d-l}{2} \leq y \leq \frac{d-l}{2} + l$ e

$$0 \leq z \leq L \Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_e = -q'';$$

onde as condições de contorno 8, 9, 10 e 11 descrevem que a soma algébrica dos fluxos de calor e massa do meio poroso é igual ao fluxo de calor, q'' , com seu respectivo sinal.

b) Para a umidade:

1) o conteúdo de umidade inicial do solo é constante e igual a θ_0 ;

2) existe simetria na fronteira norte do domínio, para $y = d$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$;

3) existe simetria na fronteira sul do domínio, para $y = 0$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$;

4) existe simetria na fronteira leste do domínio, para $x = d$, $0 \leq y \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$;

5) existe simetria na fronteira oeste do domínio, para $x = 0$, $0 \leq y \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$;

6) existe simetria na fronteira anterior do domínio, $z = 0$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq y \leq d \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$

7) existe simetria na fronteira posterior do domínio, $z = L$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq y \leq d \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$

8) não há fluxo de umidade na fronteira norte do duto, para $y = \frac{d-l}{2} + l$, $\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l$ e

$$0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_s = 0;$$

9) não há fluxo de umidade na fronteira sul do duto, para $y = \frac{d-l}{2}$, $\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l$ e

$$0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_n = 0;$$

10) não há fluxo de umidade na fronteira leste do duto, para $x = \frac{d-l}{2} + l$, $\frac{d-l}{2} \leq y \leq \frac{d-l}{2} + l$

$$\text{e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_w = 0;$$

11) não há fluxo de umidade na fronteira oeste do duto, para $x = \frac{d-l}{2}$, $\frac{d-l}{2} \leq y \leq \frac{d-l}{2} + l$ e

$$0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_e = 0,$$

onde as condições de contorno 8, 9, 10 e 11 descrevem que a soma algébrica dos fluxos de calor e massa do meio poroso é igual a um fluxo de massa nulo nas suas respectivas fronteiras.

3.3.2 Condições de contorno para o modelo de um duto com convecção

O domínio computacional do modelo de um duto com convecção é similar ao modelo precedente com a inclusão da condição convectiva na face superior (norte), a qual realiza troca convectiva com o meio ambiente, como mostra a Figura 3.9.

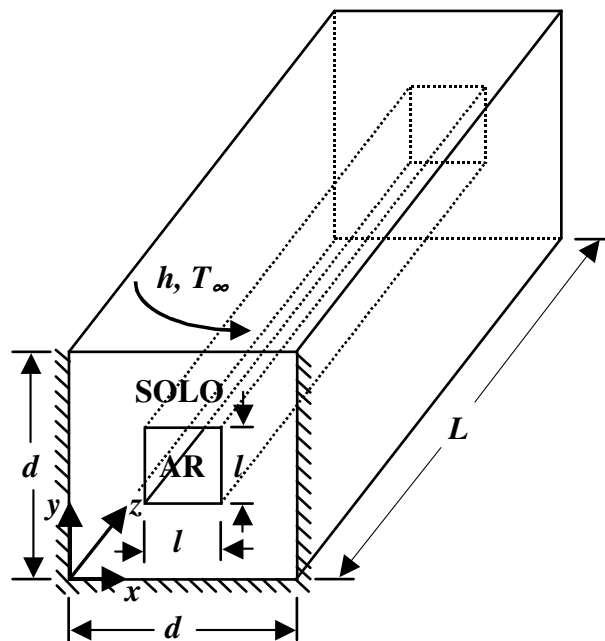


Figura 3.9 – Domínio computacional do modelo de um duto com convecção

Todas as condições de contorno, tanto para a temperatura como para a umidade, são idênticas àquelas utilizadas no modelo precedente, salvo as correspondentes à fronteira norte do domínio (solo), que são reescritas, conforme segue:

a) Para a temperatura:

2) na fronteira norte do domínio (solo) há troca convectiva, para $y = d$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow$

$$-(k_e + \rho_l h_v D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - \rho_l h_v D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_n = h (T_{sup} - T_\infty)$$

Esta condição de contorno descreve que na fronteira norte a soma algébrica dos

fluxos de calor e massa do meio poroso é igual ao fluxo de calor convectivo com seu respectivo sinal.

b) Para a umidade:

2) não há fluxo de umidade na fronteira norte do domínio (solo), para $y = d$, $0 \leq x \leq d$ e

$$0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_n = 0$$

Esta condição de contorno descreve que na fronteira norte a soma algébrica dos fluxos de calor e massa do meio poroso é igual ao fluxo de massa nulo.

3.3.3 Condições de contorno para o modelo de dois dutos isolados

O domínio computacional do modelo de dois dutos isolados é mostrado pela Figura 3.10. Neste modelo, também, todas as faces externas são consideradas impermeáveis à passagem da umidade e isoladas termicamente e as faces internas dos dois dutos, preenchidas por ar, também são impermeáveis à passagem da umidade.

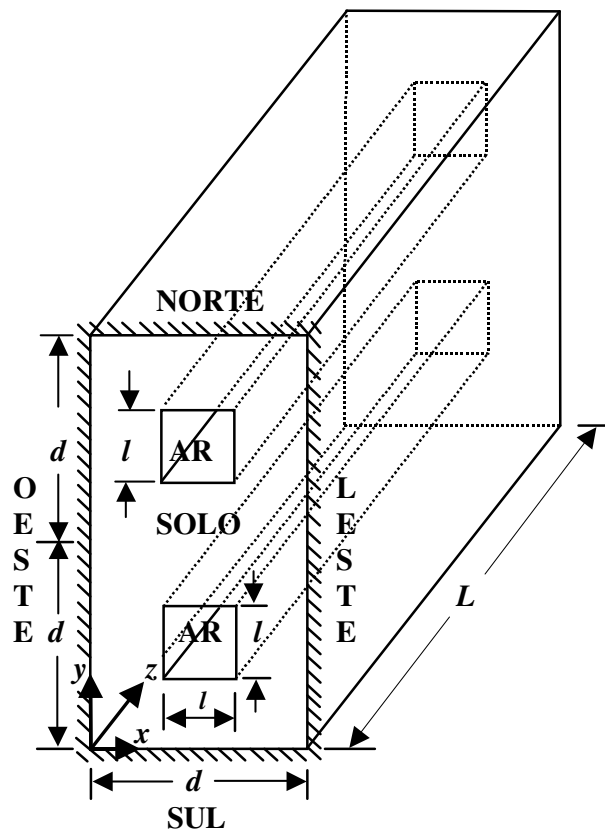


Figura 3.10 – Domínio computacional do modelo de dois dutos isolados

Muitas das condições de contorno deste modelo, tanto para a temperatura como para a umidade, são idênticas àsquelas empregadas no modelo de um duto isolado, mas o acréscimo do segundo duto que compõe o modelo originou outras condições de contorno diferentes. Sendo assim, optou-se por apresentar todas as condições de contorno deste modelo, ou seja, expor as novas condições de contorno e rerepresentar aquelas já vistas no modelo de um duto isolado.

a) Para a temperatura:

- 1) a temperatura inicial de todo o meio poroso (solo) é de 20 °C;
- 2) a fronteira norte do domínio (solo) é isolada, para $y = 2d$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial y} = 0$;
- 3) a fronteira sul do domínio (solo) é isolada, para $y = 0$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial y} = 0$;
- 4) a fronteira leste do domínio (solo) é isolada, para $x = d$, $0 \leq y \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = 0$;
- 5) a fronteira oeste do domínio (solo) é isolada, para $x = 0$, $0 \leq y \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = 0$;
- 6) assumindo que a fronteira anterior do domínio (solo) é isolada, exceto para os dois quadrados centrais de lado l , nos quais aplica-se a variação periódica da temperatura do meio ambiente. Considerando a retirada dos quadrados centrais, a apresentação da condição de contorno na fronteira anterior fica mais clara se esta fronteira for dividida em cinco regiões, conforme mostra a Figura 3.11. Assim, as condições de contorno correspondentes às cinco regiões, são dadas na seqüência:

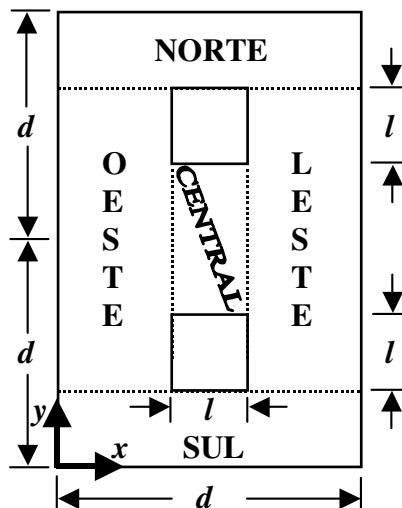


Figura 3.11 – Regiões da fronteira anterior do modelo de dois dutos isolados

-na região sul, para $z = 0$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq y \leq \frac{d-l}{2} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

-na região oeste, para $z = 0$, $0 \leq x \leq \frac{d-l}{2}$ e $\frac{d-l}{2} \leq y \leq 3\frac{(d-l)}{2} + 2l \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

-na região central, para $z = 0$, $\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l$ e $\frac{d-l}{2} + l \leq y \leq 3\frac{(d-l)}{2} + l \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

-na região leste, para $z = 0$, $\frac{d-l}{2} + l \leq x \leq d$ e $\frac{d-l}{2} \leq y \leq 3\frac{(d-l)}{2} + 2l \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

-na região norte, para $z = 0$, $0 \leq x \leq d$ e $3\frac{(d-l)}{2} + 2l \leq y \leq 2d \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

7) assumindo que a fronteira posterior do domínio é isolada, logo a condição de contorno é dada:

para $z = L$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq y \leq 2d \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

8) há fluxo de calor na fronteira norte do primeiro duto, para $y = \frac{d-l}{2} + l$, $\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l$ e

$$0 \leq z \leq L \Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_s = q'';$$

9) há fluxo de calor na fronteira norte do segundo duto, para $y = 3\frac{(d-l)}{2} + 2l$,

$$\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_s = q'';$$

10) há fluxo de calor na fronteira sul do primeiro duto, para $y = \frac{d-l}{2}$, $\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l$ e

$$0 \leq z \leq L \Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_n - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_n = -q'';$$

11) há fluxo de calor na fronteira sul do segundo duto, para $y = 3\frac{(d-l)}{2} + l$,

$$\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_n - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_n = -q'';$$

12) há fluxo de calor na fronteira leste do primeiro duto, para $x = \frac{d-l}{2} + l$, $\frac{d-l}{2} \leq y \leq \frac{d-l}{2} + l$

$$\text{e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_w = q'';$$

13) há fluxo de calor na fronteira leste do segundo duto, para $x = \frac{d-l}{2} + l$,

$$3\frac{(d-l)}{2} + l \leq y \leq 3\frac{(d-l)}{2} + 2l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_w = q'';$$

14) há fluxo de calor na fronteira oeste do primeiro duto, para $x = \frac{d-l}{2}$, $\frac{d-l}{2} \leq y \leq \frac{d-l}{2} + l$ e

$$0 \leq z \leq L \Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_e - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_e = -q'';$$

15) há fluxo de calor na fronteira oeste do segundo duto, para $x = \frac{d-l}{2}$,

$$3\frac{(d-l)}{2} + l \leq y \leq 3\frac{(d-l)}{2} + 2l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_e - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_e = -q'',$$

onde as condições de contorno 8 até 15 descrevem que a soma algébrica dos fluxos de calor e massa do meio poroso é igual ao fluxo de calor, q'' , com seu respectivo sinal.

b) Para a umidade:

1) o conteúdo de umidade inicial do solo é constante e igual a θ_0 ;

2) existe simetria na fronteira norte do domínio, para $y = 2d$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$;

3) existe simetria na fronteira sul do domínio, para $y = 0$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$;

4) existe simetria na fronteira leste do domínio, para $x = d$, $0 \leq y \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$;

5) existe simetria na fronteira oeste do domínio, para $x = 0$, $0 \leq y \leq d$ e $0 \leq z \leq L \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$;

6) existe simetria na fronteira anterior do domínio, $z = 0$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq y \leq d \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$

7) existe simetria na fronteira posterior do domínio, $z = L$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq y \leq d \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$

8) não há fluxo de umidade na fronteira norte do primeiro duto, para $y = \frac{d-l}{2} + l$,

$$\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s - D_\theta \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_s = 0;$$

9) não há fluxo de umidade na fronteira norte do segundo duto, para $y = 3\frac{(d-l)}{2} + 2l$,

$$\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s - D_\theta \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_s = 0;$$

10) não há fluxo de umidade na fronteira sul do primeiro duto, para $y = \frac{d-l}{2}$,

$$\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_n = 0;$$

11) não há fluxo de umidade na fronteira sul do segundo duto, para $y = 3 \frac{(d-l)}{2} + l$,

$$\frac{d-l}{2} \leq x \leq \frac{d-l}{2} + l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_n = 0;$$

12) não há fluxo de umidade na fronteira leste do primeiro duto, para $x = \frac{d-l}{2} + l$,

$$\frac{d-l}{2} \leq y \leq \frac{d-l}{2} + l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_w = 0;$$

13) não há fluxo de umidade na fronteira leste do segundo duto, para $x = \frac{d-l}{2} + l$,

$$3 \frac{(d-l)}{2} + l \leq y \leq 3 \frac{(d-l)}{2} + 2l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_w = 0;$$

14) não há fluxo de umidade na fronteira oeste do primeiro duto, para $x = \frac{d-l}{2}$,

$$\frac{d-l}{2} \leq y \leq \frac{d-l}{2} + l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_e = 0;$$

15) não há fluxo de umidade na fronteira oeste do segundo duto, para $x = \frac{d-l}{2}$,

$$3 \frac{(d-l)}{2} + l \leq y \leq 3 \frac{(d-l)}{2} + 2l \text{ e } 0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_e = 0,$$

onde as condições de contorno 8 até 15 descrevem que a soma algébrica dos fluxos de calor e massa do meio poroso é igual a um fluxo de massa nulo nas suas respectivas fronteiras.

3.3.4 Condições de contorno para o modelo de dois dutos com convecção

Este modelo é idêntico ao anterior, porém com o acréscimo de uma condição convectiva na sua face norte. O domínio computacional deste modelo é mostrado na Figura 3.12.

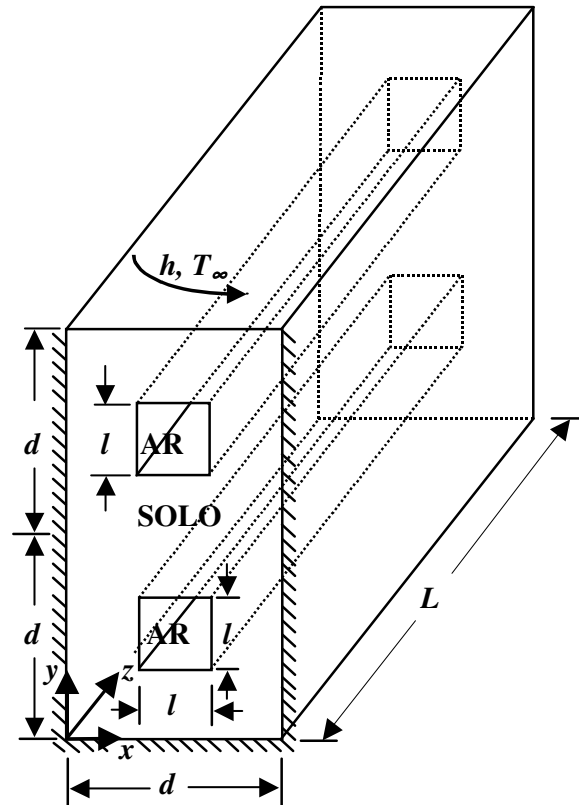


Figura 3.12 – Domínio computacional do modelo de dois dutos com convecção

De maneira análoga ao modelo de um duto com convecção, neste modelo quase a totalidade das condições de contorno, tanto para a temperatura como para a umidade, são idênticas àquelas utilizadas no modelo isolado, logo são reescritas, a seguir, somente as condições de contorno correspondentes à fronteira norte do domínio (solo).

a) Para a temperatura:

2) na fronteira norte do domínio (solo) há troca convectiva, para $y = 2d$, $0 \leq x \leq d$ e $0 \leq z \leq L$

$$\Rightarrow -(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_n = h (T_{sup} - T_\infty)$$

Esta condição de contorno descreve que na fronteira norte a soma algébrica dos fluxos de calor e massa do solo é igual ao fluxo de calor convectivo com seu respectivo sinal.

b) Para a umidade:

2) não há fluxo de umidade na fronteira norte do domínio (solo), para $y = 2d$, $0 \leq x \leq d$ e

$$0 \leq z \leq L \Rightarrow -D_T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_n = 0$$

Finalmente, esta condição de contorno descreve que na fronteira norte a soma algébrica dos fluxos de calor e massa do meio poroso é igual ao fluxo de massa nulo.

4 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

A primeira parte da metodologia de solução do problema físico, formado pelo sistema trocador-armazenador de calor no solo, corresponde à simplificação da análise deste problema apresentada no Capítulo 3. Assim, como ficou definido naquele capítulo, a resolução do problema associado ao sistema trocador-armazenador de calor no solo foi simplificada à solução do modelo computacional de um duto isolado com seção transversal quadrada, apresentado na Figura 3.3, que foi denominado de modelo de um duto isolado. A metodologia de solução prossegue no presente capítulo, com a apresentação da metodologia numérica empregada na resolução do modelo de um duto isolado e, também, dos demais modelos computacionais analisados neste trabalho. Na seção correspondente à metodologia numérica são apresentados: os diferentes acoplamentos que participam dos modelos analisados, a análise de independência da malha para uma das situações mais significativas e um estudo de validação desta metodologia através da comparação entre os resultados obtidos pela aplicação da mesma com aqueles encontrados em um modelo idêntico ao proposto por Gauthier *et alli*, 1997. Na segunda parte do capítulo, é apresentada uma análise da substituição de cabos de seção transversal circular por cabos de seção transversal quadrada de área equivalente. Para tal, é apresentado o modelo de um cabo de seção transversal quadrada e os resultados obtidos para várias simulações deste modelo são comparados com os encontrados pelo modelo de um cabo de potência circular apresentado por Damasceno Ferreira, 1993.

4.1 Metodologia numérica

A metodologia numérica proposta emprega o Método dos Volumes Finitos descrito por Patankar, 1980, para resolver os quatro modelos computacionais apresentados no Capítulo 3. A operacionalização desta metodologia é realizada através do uso do programa de propósitos gerais de Patankar, 1982, na sua versão tridimensional em coordenadas cartesianas, sendo empregado o algoritmo TDMA (*TriDimensional-Matrix Agorithm*) para a resolução do sistema de equações diferenciais governantes dos modelos avaliados.

O tipo de solo utilizado nas simulações dos quatro modelos computacionais investigados foi o denominado de aluvião arenoso, cuja escolha baseou-se no fato de que suas propriedades difusivas e termofísicas estão disponíveis na literatura, conforme apresentado por Hartley, 1977, sendo o mesmo solo empregado por Damasceno Ferreira, 1993, no seu estudo de transferência de calor e migração de umidade em solos que envolvem cabos de potência

enterrados. Todas as constantes e expressões das propriedades difusivas e termofísicas, que intervêm nos modelos computacionais utilizando um solo do tipo aluvião arenoso, são apresentadas no Apêndice II. Em todas as situações analisadas o solo encontra-se a uma temperatura inicial de 20 °C e um conteúdo de umidade inicial de 0,25. É importante ressaltar que a utilização de outro tipo de meio poroso nos modelos computacionais analisados pode ser implementado facilmente desde que estejam disponíveis as expressões para as propriedades do meio poroso considerado.

Como a condição de contorno que representa a evolução da temperatura interna da estufa, que também reproduz a variação da temperatura do ar na entrada do(s) duto(s), é complexa (não periódica), optou-se por empregar como condição de contorno dos quatro modelos computacionais investigados, uma senóide com um período de 24 horas, mostrada pela Figura 4.1. A escolha de uma senóide para reproduzir a variação da temperatura do ar dentro da estufa, deve-se ao fato de que a evolução da temperatura interna, a qual resulta da radiação que o solo da estufa absorve e transmite para o ar, segue uma função senoidal. A utilização de uma amplitude de 14 °C tem como objetivo manter as variações da temperatura do ar interno da estufa dentro de valores próximos dos reais, semelhantes aos empregados por Gauthier *et alli*, 1997.

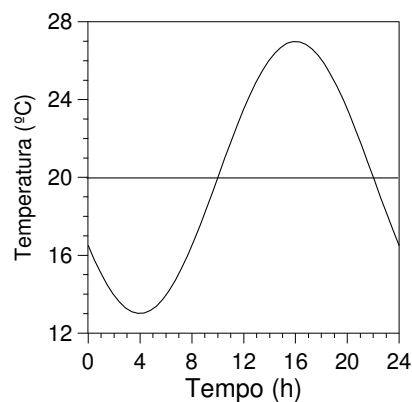


Figura 4.1 – Variações da temperatura do ar na entrada do(s) duto(s)

A solução numérica das equações diferenciais governantes dos modelos computacionais avaliados é realizada em duas etapas. Na primeira, utilizando a senóide para fornecer a variação da temperatura do ar na entrada do duto, são simulados vários ciclos de 24 horas até que um regime periódico seja alcançado. O critério de convergência deste regime periódico é assumido igual a 10^{-7} da diferença das temperaturas de cada um dos volumes de controle do domínio computacional para duas iterações consecutivas. Na segunda etapa de resolução, é simulado um novo ciclo de 24 horas para calcular o calor volumétrico armazenado pelo modelo em questão, denotado por Q , que é calculado a cada passo temporal utilizando a seguinte equação:

$$Q = C \Delta x \Delta y \Delta z (T - T_0) \quad (4.1)$$

onde $\Delta x \Delta y \Delta z$ representa a dimensão do volume de controle, T é a temperatura do volume do controle no instante de tempo atual do cálculo e T_0 é a temperatura do volume de controle no instante de tempo anterior. Em todas as simulações dos diferentes modelos computacionais analisados, utiliza-se um passo temporal de 300 segundos, que é o mesmo empregado por Gauthier *et alli*, 1997.

Todos os modelos computacionais avaliados possuem os mesmos três tipos de acoplamentos que são resolvidos seqüencialmente por esta metodologia numérica. O primeiro é aquele existente entre o escoamento interno de ar e a temperatura superficial do duto, o qual permite determinar a evolução da temperatura do fluxo de ar ao longo deste duto. O segundo acoplamento é o que existe entre o escoamento interno de ar e o solo envolvente ao duto. O terceiro acoplamento é aquele correspondente à transferência simultânea de calor e umidade no solo. A seguir, cada um destes três acoplamentos são apresentados separadamente.

4.1.1 Acoplamento entre o escoamento interno e a temperatura superficial do duto

Conforme foi visto no Capítulo 3, o escoamento de ar ao longo de todo o duto é resolvido através de sucessivos balanços de energia em cada uma das fatias em que ele é fracionado. Como naquele capítulo também foi assumido que a resistência térmica da parede do duto é considerada desprezível em relação a do solo envolvente, é preciso definir a região do domínio computacional que representa esta parede. É nesta região do domínio que é recalculada a temperatura superficial do duto necessária para realizar seu acoplamento com o escoamento interno. Assim, escolheu-se a região do domínio formada pela primeira camada de volumes de controle, que representam o solo envolvente, para fornecer a temperatura superficial do duto. Esta região é mostrada em primeiro plano na Figura 4.2, através de uma ampliação da região de entrada de ar do modelo de um duto isolado. Como a evolução da temperatura do escoamento ao longo do duto é determinada através de sucessivos balanços de energia em cada uma das fatias em que ele é dividido, a região formada pela primeira camada interna de solo envolvente é particionada em fatias de espessura igual a Δz . Na Figura 4.2 é detalhada uma destas fatias, denominada de duto elementar.

A equação (3.8), encontrada através de um balanço de energia em uma fatia genérica do duto de seção transversal quadrada, é utilizada seqüencialmente nos diferentes dutos elementares para determinar a evolução da temperatura ao longo de todo o duto que compõe o modelo computacional analisado.

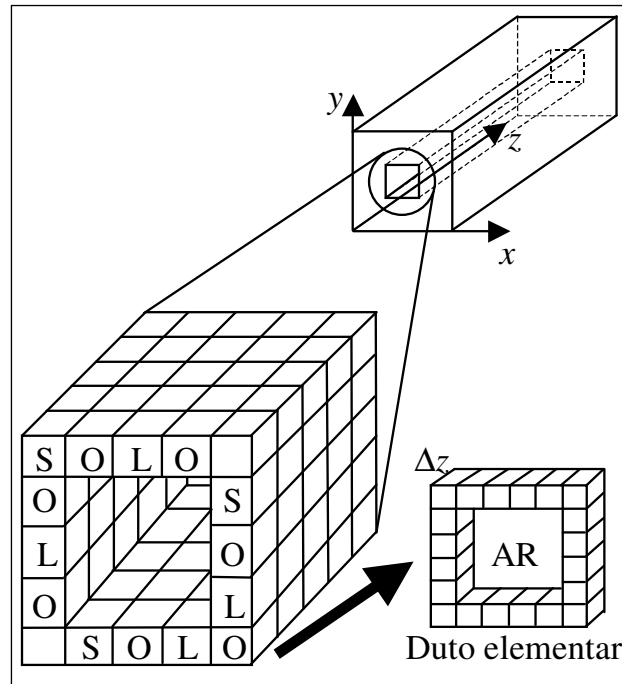


Figura 4.2 – Região formada pela primeira camada de solo envolvente e um duto elementar

Visando simplificar a discussão dos dois acoplamentos restantes, a Figura 4.3 apresenta o esquema representativo, em duas dimensões, de um volume de controle genérico com seus respectivos volumes adjacentes. Nos pontos indicados neste esquema são definidas as temperaturas e os conteúdos de umidade no centro de um volume de controle qualquer e de seus volumes adjacentes. Assim, tem-se a temperatura em um volume de controle genérico, notada por T_P , e as temperaturas dos volumes adjacentes denominadas de T_N , T_S , T_E e T_W . Já o conteúdo de umidade nestes mesmos pontos são notados por: θ_p , θ_N , θ_S , θ_E e θ_W . Nesta figura também são apresentadas, em negrito, as interfaces entre o volume de controle e seus volumes adjacentes. De forma análoga às denominações anteriores, as temperaturas e os conteúdos de umidade nestas interfaces são notados, respectivamente, por: T_n , T_s , T_e , T_w e θ_n , θ_s , θ_e e θ_w .

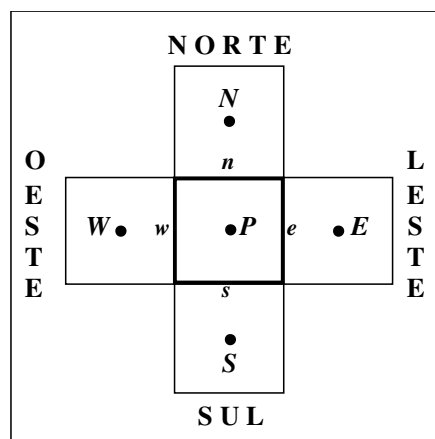


Figura 4.3 – Esquema representativo de um volume de controle em duas dimensões

Deste modo, nas apresentações dos dois acoplamentos a serem discutidos a seguir serão utilizados esquemas representativos de volumes de controle em duas dimensões, similares ao da Figura 4.3, bem como as mesmas notações para a temperatura e para o conteúdo de umidade acima apresentadas.

4.1.2 Acoplamento entre o escoamento interno de ar e o solo envolvente ao duto

O segundo tipo de acoplamento a ser resolvido, que diz respeito ao fluxo convectivo de calor entre o escoamento interno de ar e o solo envolvente ao duto, é analisado a partir da Figura 4.4. Esta figura apresenta o esquema representativo de um corte xy do domínio computacional para o modelo de um duto isolado, onde a região do solo é destacada em cinza. Este esquema destaca, em negrito, todas as interfaces ar-solo que realizam troca térmica entre os volumes de controle que representam o solo e o ar do escoamento interno. Ainda, como a temperatura do ar, T_{ar} , é a mesma para todos os volumes de controle que representam o escoamento nesse corte xy , ela é representada por um único ponto.

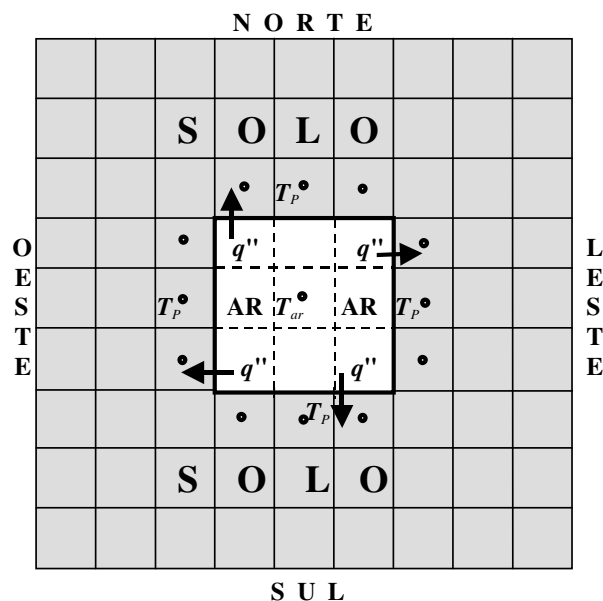


Figura 4.4 – Volumes de solo adjacentes às interfaces ar-solo

O acoplamento do fluxo convectivo entre o escoamento de ar e o solo envolvente do duto é realizado em duas etapas. Na primeira, é eliminada a influência da temperatura do escoamento nas fronteiras correspondentes às interfaces ar-solo, o que é feito isolando-se estas interfaces. Na segunda etapa, os fluxos que atravessam as interfaces ar-solo são fornecidos por termos fontes localizadas nos volumes de solo adjacentes a estas interfaces, indicados por alguns pontos do domínio computacional mostrado na Figura 4.4.

4.1.3 Acoplamento da transferência simultânea de calor e umidade no solo

O terceiro acoplamento a ser analisado é solucionado resolvendo alternadamente as equações governantes do transporte de energia e de umidade no solo, dadas pelas expressões (3.5) e (3.6), respectivamente. Para isso, as condições de contorno destas equações devem ser recalculadas a cada alternância da equação de transporte que está sendo resolvida no momento. Assim, a cada troca de equação de transporte, devem ser atualizados os valores de temperatura e de conteúdo de umidade nas fronteiras externas e internas da região do solo destacada em cinza na Figura 4.5.

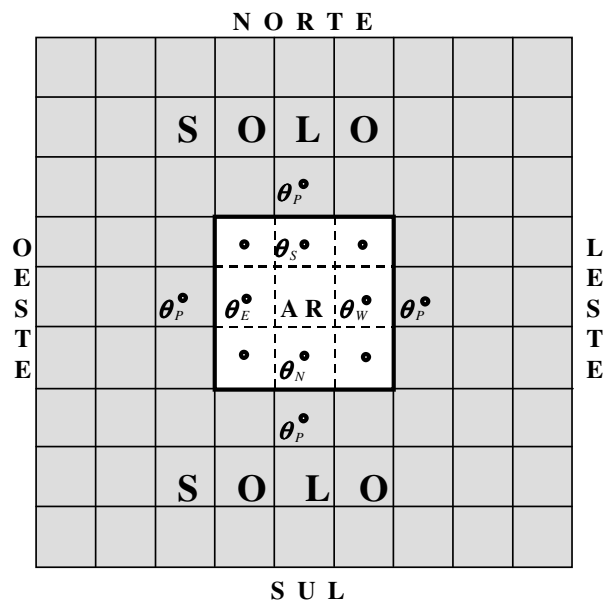


Figura 4.5 – Volumes de ar adjacentes às interfaces ar-solo

Nos modelos de um e de dois dutos isolados, as temperaturas de todas as fronteiras externas são atualizadas a cada alternância da equação de transporte como sendo a mesma do volume de controle, visto que nestes modelos todas as faces externas do domínio computacional estão isoladas termicamente.

Para os modelos de um e de dois dutos com convecção, as temperaturas das fronteiras externas são atualizadas de forma idêntica a dos modelos isolados, exceto nas fronteiras da face norte do domínio computacional, onde o solo realiza troca térmica com o meio ambiente.

Como as fronteiras externas dos quatro modelos são impermeáveis à passagem de umidade, a cada troca da equação de transporte o conteúdo de umidade nestas fronteiras é atualizado como sendo o mesmo do volume de controle.

A Figura 4.5 apresenta pontos em alguns volumes de controle do solo, que possuem

conteúdos de umidade θ_v , bem como as denominadas fronteiras internas do solo, indicadas por pontos localizados dentro da região correspondente ao ar do escoamento. Como os volumes de controle que contêm estas fronteiras internas não pertencem à região representativa do solo, eles são chamados de volumes fictícios. Considerando que, em todos os volumes de controle correspondente ao ar do escoamento o conteúdo de umidade foi prescrito igual ao inicial, é necessário atualizar o conteúdo de umidade nestes volumes fictícios. Assim, a cada alternância da equação governante, deve ser realizada a atualização do conteúdo de umidade nas fronteiras internas. A atualização da temperatura nas fronteiras internas do solo (volumes fictícios), por sua vez, é realizada automaticamente, visto que a temperatura nestes volumes fictícios assume o valor da temperatura do escoamento de ar, a qual é recalcula a cada iteração.

4.1.4 Análise de independência da malha

A análise de independência da malha tem por finalidade examinar a variabilidade do calor volumétrico armazenado no solo em função do refinamento da malha. Para tanto, é executado um refinamento na malha até que a variação do calor volumétrico armazenado no solo deixe de ser significativa. Neste processo de refinamento deve-se levar em consideração o conseqüente crescimento exponencial do tempo de processamento, de tal forma que tornar-se-á uma restrição a ser atendida.

Visando realizar a análise de independência da malha para uma das situações mais desfavoráveis, escolheu-se o modelo de um duto isolado com os seguintes valores para seus parâmetros: diâmetro do duto de 0,1 m, conteúdo de umidade inicial do solo de 0,25, velocidade de escoamento do ar de 4 m/s, distância entre centros dos dutos de 0,2 m e comprimento do duto de 5 metros.

A Tabela 4.1 apresenta os valores da análise do refinamento da malha no plano xy . Na primeira coluna desta tabela é apresentado o tamanho da malha avaliada e, na segunda coluna, o correspondente número de volumes de controle em xy . A terceira e quarta colunas expõem, respectivamente, os tempos de processamento para o modelo computacional tornar-se periódico e para o cálculo do calor armazenado no solo. A quinta e sexta colunas discriminam a quantidade de calor volumétrico armazenado no solo e a diferença percentual entre o calor volumétrico armazenado no solo associado à malha em questão e o correspondente à malha anterior. Para minimizar os tempos de processamento, os modelos computacionais associados às quatro malhas avaliadas são simulados empregando somente a resolução da equação da temperatura.

Visando verificar a influência da umidade na quantidade de calor volumétrico armazenado no solo, também é simulado o modelo de um duto isolado com uma malha de $75 \times 75 \times 20$ volumes de controle, considerando o acoplamento entre a temperatura e a umidade. Assim, constata-se que a variação percentual entre o calor volumétrico armazenado para o modelo simulado com a resolução da temperatura e para aquele com resolução acoplada de temperatura e umidade é de $2,26 \times 10^{-4} \%$. Em contraste, o tempo de processamento para o modelo tornar-se periódico com resolução acoplada é de aproximadamente 3,5 vezes maior que o empregado na simulação do modelo com resolução da equação da temperatura.

No refinamento da malha no plano xy , verifica-se que a diferença percentual entre o calor volumétrico armazenado para a malha $30 \times 30 \times 20$ volumes de controle e para a malha $75 \times 75 \times 20$ é de apenas 0,76 %, enquanto que o tempo de processamento para o modelo usando esta última malha é maior em mais de 13 vezes que o tempo gasto pelo modelo que utiliza a menor malha.

Tabela 4.1 – Refinamento da malha em xy do modelo de um duto isolado

MALHA	Número de Volumes de Contr. em xy	Tempo de simul. até Periód. (h)	Tempo de simul. p/cal. Calor (min)	Calor por Volume (MJ/m³)	Varição Percentual (%)
em xy	Resolvendo somente a temperatura (umidade constante)				
30×30×20	900	0,85	4,93	7,019862	-
45×45×20	2025	1,92	11,65	7,050811	0,44
60×60×20	3600	5,02	30,43	7,065261	0,20
75×75×20	5625	11,55	71,13	7,073572	0,12
em xy	Resolvendo também o conteúdo de umidade (umidade variável)				
75×75×20	5625	41,40	245,93	7,073588	$2,26 \times 10^{-4}$

A Tabela 4.2 mostra os valores da análise do refinamento da malha na direção do eixo z . Esta tabela apresenta os resultados obtidos para simulações do modelo de um duto isolado com quatro malhas distintas e empregando a resolução da equação da temperatura. Para a malha $30 \times 30 \times 65$ volumes de controle, também é realizada a simulação do modelo resolvendo de forma acoplada a temperatura com a umidade. No caso desta última malha, a diferença percentual do calor volumétrico armazenado no solo para a resolução da temperatura e da resolução da temperatura acoplada com a umidade é de $-1,99 \times 10^{-4} \%$ e o tempo de processamento para a resolução acoplada é mais de três vezes superior ao gasto na resolução da equação da energia.

Comparando os percentuais de variação do calor volumétrico armazenado no solo empregando um refinamento da malha no plano xy (Tabela 4.1) e na direção do eixo z (Tabela 4.2), pode-se concluir que o refinamento nesta última direção é muito menor que aquele realizado no plano xy , logo, o refinamento na direção do eixo z não será considerado

significativo e, portanto, serão mantidos os 20 volumes de controle na direção do eixo z.

Tabela 4.2 – Refinamento da malha em z do modelo de um duto isolado

MALHA	Número de Volumes de Contr. em z	Tempo de simul. até Periód. (h)	Tempo de simul. p/cal. Calor (min)	Calor por Volume (MJ/m ³)	Variação Percentual (%)
em z	Resolvendo somente a temperatura (umidade constante)				
30×30×20	20	0,85	4,83	7,019862	-
30×30×35	35	1,49	9,24	7,019970	1,54×10 ⁻³
30×30×50	50	2,41	14,86	7,019996	3,70×10 ⁻⁴
30×30×65	65	2,93	17,99	7,020006	1,42×10 ⁻⁴
em z	Resolvendo também o conteúdo de umidade (umidade variável)				
30×30×65	65	9,29	55,47	7,019992	-1,99×10 ⁻⁴

A análise da Tabela 4.1 mostra que um refinamento da malha para 60×60×20 volumes de controle produz um aumento de 2,5 vezes no tempo de processamento em relação à malha de 45×45×20 volumes de controle, porém, em contrapartida, provoca uma variação percentual de apenas 0,20 % no calor volumétrico armazenado no solo. Assim, optou-se por uma malha de 45×45×20 volumes de controle para ser utilizada em todas as simulações dos quatro modelos computacionais abordados neste trabalho. Cabe ressaltar que Gauthier *et alli*, 1997, utilizaram malhas de 26×26×15 a 46×46×15 volumes de controle para um modelo computacional semelhante de um duto isolado.

4.1.5 Validação da metodologia numérica

A validação da metodologia numérica proposta é realizada através da comparação dos calores volumétricos armazenados no solo, obtidos por esta metodologia, com aqueles encontrados por Gauthier *et alli*, 1997, que utilizaram o Método das Diferenças Finitas para resolver numericamente o modelo de um duto isolado. Para poder comparar os calores volumétricos armazenados no solo, obtidos empregando as duas metodologias numéricas, é reproduzido o modelo de um duto isolado investigado pelos autores citados, ou seja, utilizou-se um domínio computacional de idênticas dimensões com os mesmos valores dos parâmetros e das propriedades difusivas e termofísicas empregadas pelos autores. A temperatura e o conteúdo de umidade iniciais em todo o domínio computacional deste modelo são iguais a 20 °C e 0,25, respectivamente. A condição de contorno periódica para a temperatura do ar na entrada do duto é dada pelo arquivo de temperatura fornecido por Gauthier *et alli*, 1997, reproduzido na Figura 4.6.

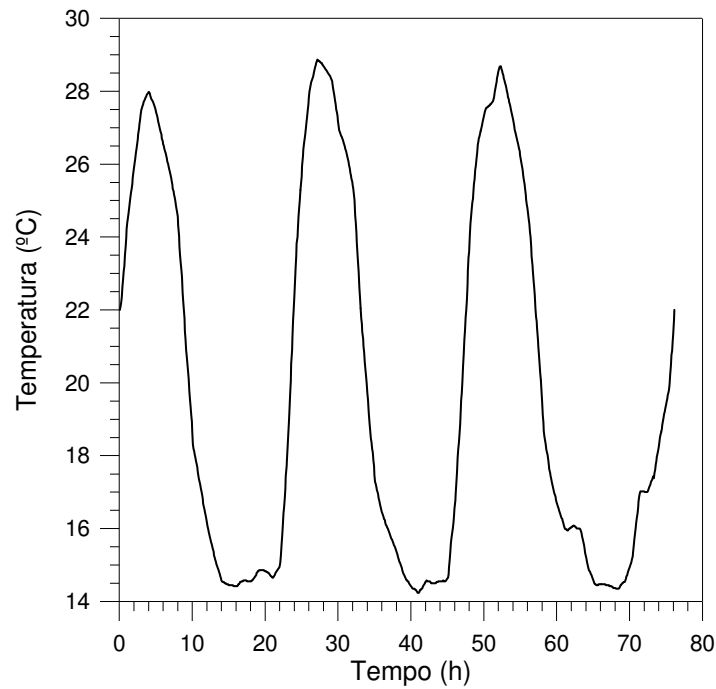


Figura 4.6 – Arquivo da temperatura do ar na entrada do duto – Fonte: Gauthier *et alli*, 1997

No modelo em questão empregou-se uma malha uniformemente distribuída de $26 \times 26 \times 15$ volumes de controle, sendo as distâncias entre centros de 0,25, 0,4 e 0,55 m combinadas com comprimentos do duto de 5, 10 e 20 metros. Também, utilizou-se um duto de lado $l = 0,096$ m, uma velocidade de escoamento do ar dentro do duto de 4 m/s e um passo temporal de 300 segundos. Para este modelo, foi necessário assumir valores constantes de $2,31 \text{ MJ/m}^3$, para a capacidade calórica, e de $1,95 \text{ W/mK}$, para a condutividade térmica do solo, sendo o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o escoamento de ar e o solo considerado constante é igual a $23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos calores volumétricos armazenados no solo durante 24 horas obtidos em diferentes simulações para o presente modelo e aqueles apresentados por Gauthier *et alli*, 1997.

Tabela 4.3 - Calor volumétrico armazenado no solo durante 24 horas

Distância entre centros (d) e comprimento do duto (L)	Gauthier <i>et al.</i> (MJ/m^3)	Presente modelo (MJ/m^3)	Diferença percentual
$d = 0,25 \text{ m}$, $L = 05 \text{ m}$	14,1	13,993883	- 0,76 %
$d = 0,25 \text{ m}$, $L = 10 \text{ m}$	11,4	11,840717	3,72 %
$d = 0,40 \text{ m}$, $L = 05 \text{ m}$	5,6	5,558392	- 0,75 %
$d = 0,40 \text{ m}$, $L = 10 \text{ m}$	4,4	4,326230	- 1,71 %
$d = 0,40 \text{ m}$, $L = 20 \text{ m}$	2,8	2,822855	0,81 %
$d = 0,55 \text{ m}$, $L = 05 \text{ m}$	2,8	2,986231	6,24 %
$d = 0,55 \text{ m}$, $L = 10 \text{ m}$	2,2	2,321443	5,23 %
$d = 0,55 \text{ m}$, $L = 20 \text{ m}$	1,5	1,517484	1,15 %

Na Tabela 4.3, verifica-se que os resultados dos calores volumétricos armazenados no solo obtidos pelo presente modelo para várias situações distintas, encontram-se muito próximos daqueles obtidos por Gauthier *et alli*, 1997, para as mesmas situações. Esta tabela mostra que, para distâncias entre centros de 0,25 m e de 0,40 m, os valores dos calores volumétricos armazenados no solo obtidos pelo presente modelo possuem uma ótima aproximação com aqueles encontrados pelos autores referenciados. Mesmo para as situações correspondentes a uma distância entre centros de 0,55 m a maior diferença percentual entre os calores volumétricos armazenados no solo, que ocorre para um comprimento do duto de 5 metros, é de apenas 6,24 %. Assim, o ótimo ajuste dos resultados obtidos para todas estas situações permite validar a presente metodologia numérica com aquela proposta por Gauthier *et alli*, 1997, que, por sua vez, validaram seu modelo com dados experimentais obtidos de um sistema trocador-armazenador de calor no solo instalado em um tipo comercial de estufa de plasticultura apresentado por Bernier *et alli*, 1990a e Bernier *et alli*, 1990b.

4.2 Análise da substituição de cabos de seção circular por cabos de seção transversal quadrada de área equivalente

Esta análise tem por finalidade verificar se a substituição de dutos de seção transversal circular por dutos de seção transversal quadrada de área equivalente, proposta por Gauthier *et alli*, 1997, pode ser estendida à modelagem de cabos de seção transversal circular por cabos de seção transversal quadrada de área equivalente. Neste sentido, os resultados obtidos através das diferentes simulações do modelo de um cabo de seção transversal quadrada são comparados aos encontrados para o modelo do cabo de potência apresentados por Damasceno Ferreira, 1993. Neste trabalho, o autor investiga a transferência de calor e umidade em solos que envolvem cabos de potência circulares aterrados e utiliza coordenadas bicilíndricas para simular a geometria formada pelo meio semi-infinito contida no domínio computacional do modelo do cabo de potência.

4.2.1 Modelo do cabo de seção transversal quadrada

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram os esquemas que representam, respectivamente, os domínios físicos e os domínios computacionais dos modelos do cabo de potência e do cabo de seção transversal quadrada sobrepostos. Na Figura 4.7 o parâmetro p representa a profundidade

de aterramento dos cabos, R_c é o raio do cabo de potência e q' o fluxo de calor imposto por unidade de comprimento, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção e T_∞ é a temperatura do meio ambiente. Esta figura apresenta as condições de contorno de ambos os modelos, que são: fluxo de calor prescrito nas regiões dos cabos de potência e de seção transversal quadrada e convecção na fronteira superior do solo com o meio ambiente. Observa-se que os domínios físicos, mostrado pela Figura 4.7, apresentam simetria em relação a um eixo vertical e, assim sendo, a resolução dos modelos apresentados fica reduzida à solução da metade destes domínios.

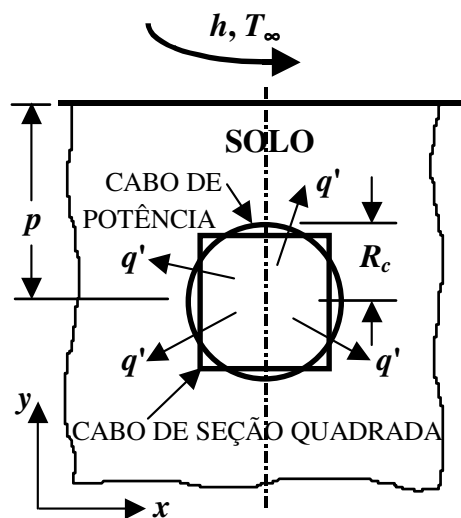


Figura 4.7 – Domínio físico dos cabos de potência e de seção transversal quadrada sobrepostos

No lado oeste dos domínios computacionais apresentados pela Figura 4.8, destaca-se o lado l do cabo de seção transversal quadrada, que é obtido multiplicando o diâmetro ($2 R_c$) do cabo de potência pelo fator $\sqrt{\pi}/2$, conforme a equação (3.1) exposta no Capítulo 3. Nesta figura, também são mostrados: a distância do cabo de seção transversal quadrada até a fronteira sul do domínio, $YL1$, e os comprimentos do domínio na direção do eixo dos x , XL , e na direção do eixo dos y , YL . É nos pontos P_{CP} e P_{CQ} , apresentados por esta figura, que se encontram posicionados na periferia do cabo de potência circular e do cabo de seção transversal quadrada, onde, mais adiante, serão avaliadas as evoluções da temperatura e da umidade para várias situações simuladas. Ressalta-se que as dimensões que aparecem no domínio computacional, mostrado na figura, não encontram-se em verdadeira grandeza, pois a região dos cabos encontra-se ampliada algumas vezes.

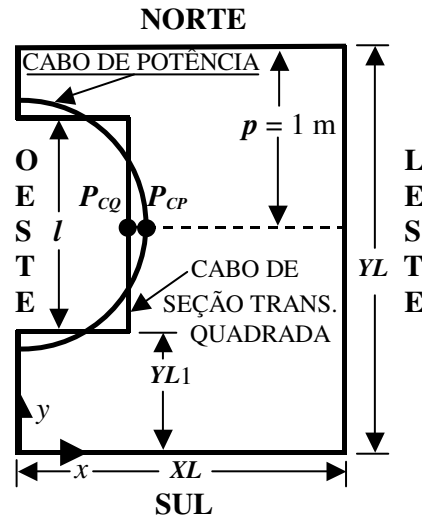


Figura 4.8 – Domínios computacionais dos cabos de potência e de seção transversal quadrada

As equações governantes do modelo do cabo de seção transversal quadrada, que representa um problema transiente e bidimensional de transferência simultânea de calor e umidade, correspondem à versão bidimensional das equações (3.5) e (3.6). Assim, as expressões das equações de transporte de energia e de umidade são dadas, respectivamente, por:

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial y} + \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_T \frac{\partial T}{\partial x} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_T \frac{\partial T}{\partial y} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] \quad (4.3)$$

A seguir, são apresentadas as condições de contorno necessárias para a resolução do sistema de equações diferenciais governantes aplicadas no domínio computacional do cabo de seção transversal quadrada apresentado pela Figura 4.8, com as correspondentes condições de contorno para a temperatura e para a umidade:

a) Condições de contorno para a temperatura:

- 1) a temperatura inicial do solo (aluvião arenoso) e do cabo é de 20 °C;
- 2) na fronteira norte do domínio (solo) há troca convectiva, para $y = YL$ e $0 \leq x \leq XL \Rightarrow$

$$-\left. (k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial y} \right|_n - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_n = h (T_{sup} - T_\infty);$$

onde T_{sup} representa a temperatura do solo na fronteira norte. Esta condição de contorno descreve que na fronteira norte a soma algébrica dos fluxos de calor e massa do meio poroso é igual ao fluxo de calor convectivo com seu respectivo sinal;

3) a fronteira sul do domínio (solo) é isolada, para $y = 0$ e $0 \leq x \leq XL \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial y} = 0$;

4) a fronteira leste do domínio (solo) é isolada, para $x = XL$ e $0 \leq y \leq YL \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = 0$;

5) parte da fronteira oeste do domínio (solo) é isolada, para $x = 0$ e $0 \leq y \leq YL1$ ou $x = 0$ e

$$YL1 + l \leq y \leq YL \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = 0;$$

6) há fluxo de calor na fronteira norte do cabo, para $y = YL1 + l$ e $0 \leq x \leq l/2 \Rightarrow$

$$-(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_n = q';$$

7) há fluxo de calor na fronteira sul do cabo, para $y = YL1$ e $0 \leq x \leq l/2 \Rightarrow$

$$-(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_s = -q';$$

8) há fluxo de calor na fronteira leste do cabo, para $x = l/2$ e $YL1 \leq y \leq YL1 + l \Rightarrow$

$$-(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - \rho_l h_{lv} D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_e = q';$$

onde estas três últimas condições de contorno descrevem que a soma algébrica dos fluxos de calor e massa do meio poroso é igual ao fluxo de calor, q' , com seu respectivo sinal.

b) Condições de contorno para a umidade:

1) o conteúdo de umidade inicial do solo e do cabo é constante e igual a θ_0 ;

2) não há fluxo de umidade na fronteira norte do domínio (solo), para $y = YL$ e $0 \leq x \leq XL \Rightarrow$

$$-D_T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_n = 0;$$

Esta condição de contorno descreve que na fronteira norte a soma algébrica dos fluxos de calor e massa do meio poroso é igual ao fluxo de massa nulo;

3) a fronteira sul do domínio é impermeável, para $y = 0$ e $0 \leq x \leq XL \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$;

4) a fronteira leste do domínio é impermeável, para $x = XL$ e $0 \leq y \leq YL \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$;

5) parte da fronteira oeste do domínio (solo) é impermeável, para $x = 0$ e $0 \leq y \leq YL1$ ou $x = 0$

$$\text{e } YL1 + l \leq y \leq YL \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0;$$

6) não há fluxo de umidade na fronteira norte do cabo, para $y = YL1 + l$ e $0 \leq x \leq l/2$ \Rightarrow

$$-D_T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_n = 0;$$

7) não há fluxo de umidade na fronteira sul do cabo, para $y = YL1$ e $0 \leq x \leq l/2$ \Rightarrow

$$-D_T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_s = 0;$$

8) não há fluxo de umidade na fronteira leste do cabo, para $x = l/2$ e $YL1 \leq y \leq YL1 + l$ \Rightarrow

$$-D_T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_w = 0;$$

onde estas três últimas condições de contorno descrevem que a soma algébrica dos fluxos de calor e massa do meio poroso é igual a um fluxo de massa nulo nas suas respectivas fronteiras.

A metodologia numérica empregada para resolver o modelo do cabo de seção transversal quadrada foi adaptada da metodologia utilizada por Damasceno Ferreira, 1993, substituindo o cabo de seção circular (cabo de potência) pelo correspondente cabo de seção transversal quadrada de área equivalente.

Na região do domínio computacional correspondente ao cabo, mostrada na Figura 4.8, são prescritas a temperatura e o conteúdo de umidade, sendo nas suas fronteiras com o solo envolvente também prescrito um fluxo de calor por unidade de comprimento. A fronteira norte do solo encontra-se submetida a uma condição de contorno convectiva, sendo as demais fronteiras (leste, sul e partes da oeste) isoladas termicamente. Todas as fronteiras externas do domínio computacional são impermeáveis à passagem de umidade.

O modelo do cabo de seção transversal quadrada emprega o solo denominado de aluvião arenoso, visto que suas propriedades difusivas e termofísicas estão disponíveis na literatura, conforme apresentado por Hartley, 1977. Todas as constantes e expressões das propriedades difusivas e termofísicas utilizadas na resolução deste modelo são apresentadas no Apêndice II. Os valores de $XL = 35,6$ m e $YL = 53,3$ m são obtidos a partir das equações que relacionam o sistema de coordenadas cartesianas com o sistema bicilíndrico, empregado por Damasceno Ferreira, 1993, no modelo do cabo de potência aterrado. O lado l do cabo de seção transversal quadrada é igual a 0,0886 m, pois este valor corresponde a um diâmetro do cabo de potência de 0,1 m multiplicado pelo fator $\sqrt{\pi}/2$, para compensar a troca das seções transversais

dos cabos, conforme proposto por Gauthier *et alli*, 1997.

São utilizadas malhas potencialmente distribuída de 58×118 e 78×158 nas diferentes simulações, sendo que na região mais próxima do cabo de seção transversal quadrada são colocados os volumes de controle de menor tamanho. Conforme Damasceno Ferreira, 1993, é assumido um coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície externa do solo e meio ambiente de $15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, pois este valor representa um nível adequado para convecção forçada moderada. O passo temporal usado nas diferentes simulações variou exponencialmente de 10 até 10^4 segundos. São investigados três conteúdos de umidade inicial do solo: 0,15, 0,32 e solo seco, sendo que a umidade interna do cabo é prescrita igual à inicial do solo. Por último, nas simulações realizadas são empregados, também, três valores de potências dissipadas no cabo, Q : 20, 40 e 80 W/m, sendo que todos estes valores foram multiplicado pelo fator $\sqrt{\pi}/2$.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para o modelo de um cabo de seção transversal quadrada e comparados com aqueles encontrados para o cabo de potência analisado por Damasceno Ferreira, 1993.

4.2.2 Resultados do modelo do cabo de seção transversal quadrada

A fim de que os resultados encontrados pelo modelo do cabo de seção transversal quadrada possam ser comparados com aqueles obtidos por Damasceno Ferreira, 1993, são utilizados os mesmos parâmetros em ambos os modelos, que são: o raio do cabo (ou seu equivalente lado do quadrado), o conteúdo de umidade do solo e a potência dissipada pelo cabo.

Para cada um dos três conteúdos iniciais de umidade usados, a comparação entre o modelo do cabo de seção transversal quadrada com o problema do cabo de potência é realizada utilizando-se dois tipos de gráficos. No primeiro, tem-se a temperatura ou o conteúdo de umidade, avaliados em pontos junto às superfícies dos cabos em função do tempo; estes pontos estão mostrados na Figura 4.8, sendo: P_{CQ} para o cabo de seção quadrada e P_{CP} para o cabo de potência. O segundo tipo de gráfico apresenta os valores de temperatura ou de conteúdo de umidade sobre uma reta horizontal, a linha tracejada da Figura 4.8. Para possibilitar a comparação dos resultados, o segundo tipo de gráfico exhibe, para certos tempos de simulação e de forma separada, a temperatura ou o conteúdo de umidade em função do logaritmo natural do quociente entre a distância ao cabo dividido pelo raio do cabo.

A seguir, são apresentados alguns dos gráficos mais representativos para os três conteúdos iniciais de umidade utilizados nos modelos. A Figura 4.9, que emprega um solo seco,

mostra as temperaturas superficiais dos cabos de seção transversal quadrada e de potência nos pontos P_{CQ} e P_{CP} em função do tempo, sendo mostradas as curvas correspondentes aos três níveis de potência dissipada em ambos os cabos. A análise desta figura revela que os resultados para os dois cabos são bastante próximos indicando que a utilização do cabo de seção transversal quadrada, para as situações mostradas, conduz a pequenas diferenças na temperatura superficial do cabo. A máxima diferença de temperatura entre as curvas é de aproximadamente 7 °C e ocorre para o caso da potência dissipada $Q = 40 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

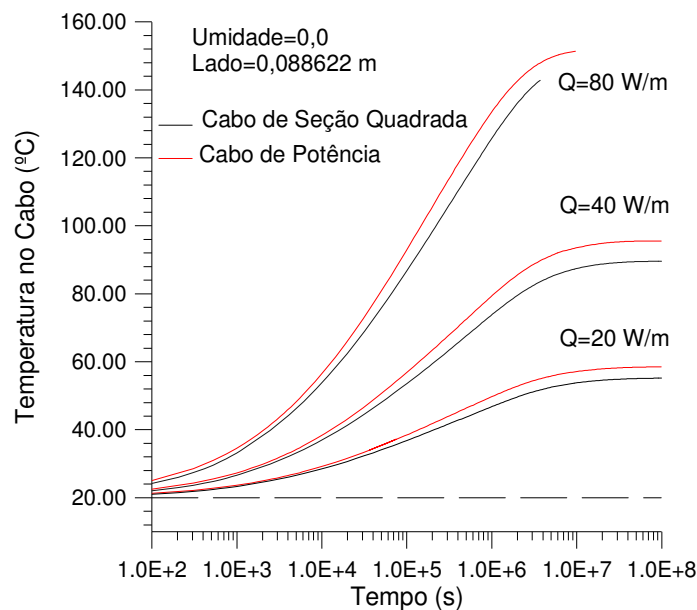


Figura 4.9 – Temperatura nos cabos de seção quadrada e de potência em função do tempo

A Figura 4.10, que utiliza um conteúdo de umidade de 0,15, apresenta a distribuição de temperatura dos cabos sobre a reta horizontal (linha tracejada da Figura 4.8) e considerando uma potência dissipada $Q = 20 \text{ W/m}$. Neste gráfico as distribuições de temperatura são avaliadas para três tempos diferentes: 37,2 horas e 12,5 e 169 dias. A análise desta figura mostra que a maior diferença entre as temperaturas do cabo de seção quadrada e as do cabo de potência é de aproximadamente 1,8 °C para um tempo de 37,2 horas.

As Figuras 4.11 a 4.13 são resultantes de simulações empregando um conteúdo inicial de umidade igual a 0,32. A primeira destas figuras apresenta as curvas de variação do conteúdo de umidade nos pontos P_{CQ} e P_{CP} dos cabos em função do tempo e utilizando as mesmas potências dissipadas do caso anterior. Observa-se nesta figura que as curvas representantes dos dois modelos possuem boa concordância para todos os valores de potência dissipada utilizados.

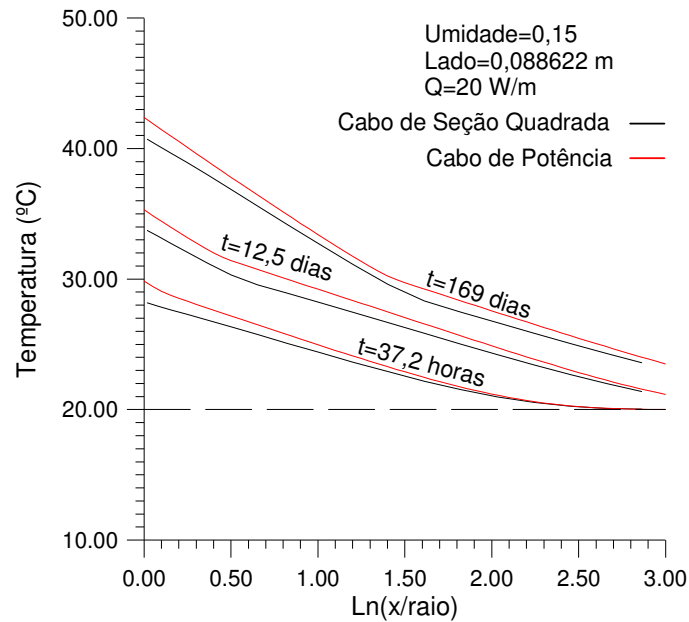


Figura 4.10 – Temperatura em função do $\text{Ln}(x/\text{Raio})$ para $Q = 20 \text{ W/m}$

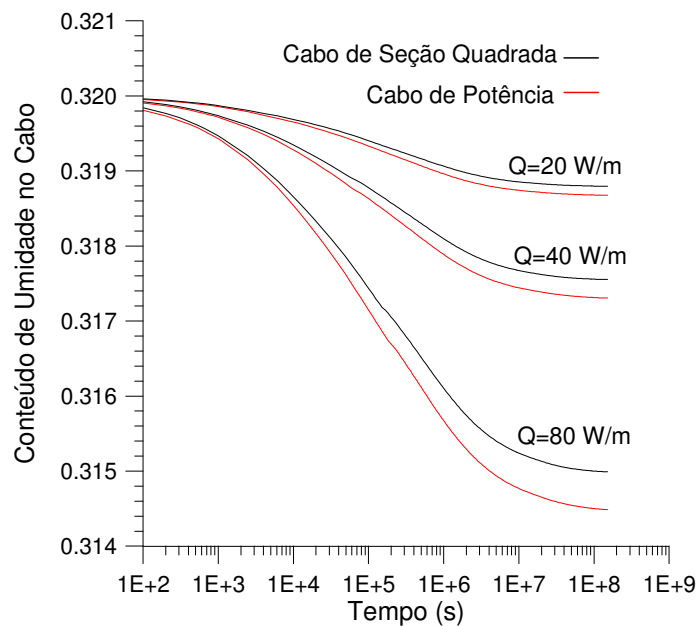


Figura 4.11 – Conteúdo de umidade nos cabos de seção quadrada e de potência

A Figura 4.12 apresenta as distribuições de temperatura dos cabos de seção quadrada e de potência sobre a reta horizontal e empregando uma potência dissipada de 80 W/m . Nesta figura, observa-se que para as três alternativas analisadas, a máxima diferença entre as temperaturas do cabo de seção quadrada e de potência é de $2,4 \text{ }^\circ\text{C}$, correspondente a um tempo de 167 horas.

A Figura 4.13 apresenta a distribuição do conteúdo de umidade nos cabos de seção quadrada e de potência sobre a reta horizontal para uma potência dissipada de 80 W/m , onde observa-se que a máxima diferença entre os valores de umidade também ocorre para o período

de tempo de 167 horas.

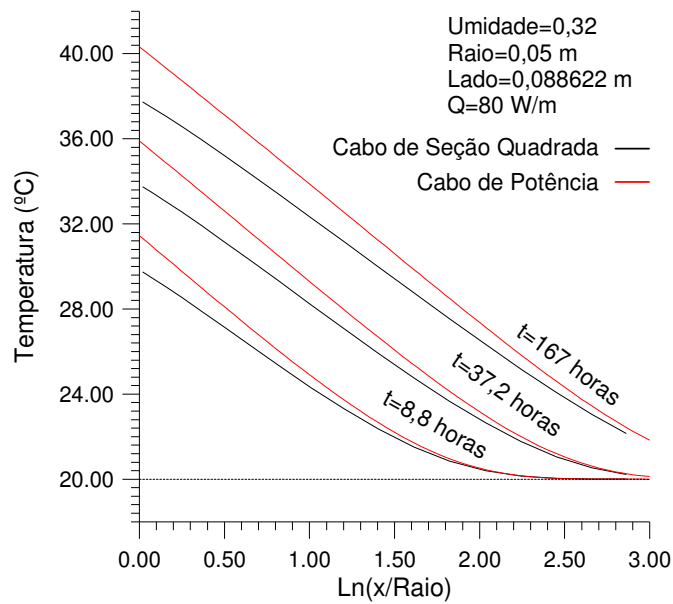


Figura 4.12 – Temperatura em função do $\text{Ln}(x/\text{Raio})$ para $Q = 80 \text{ W/m}$

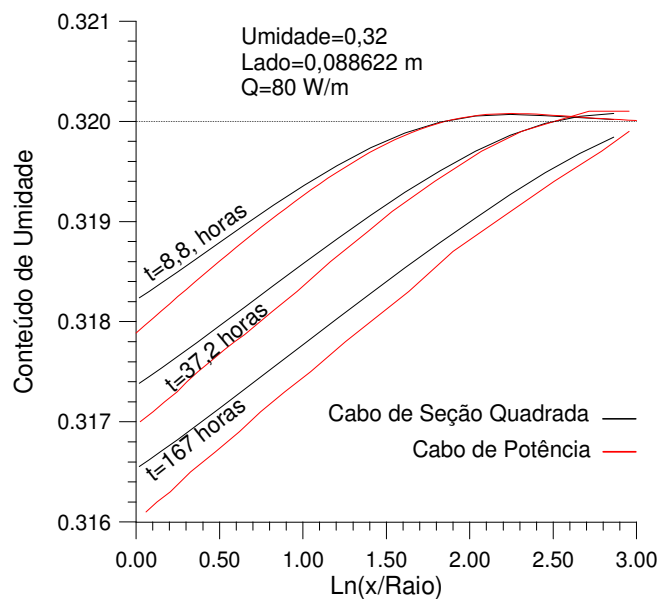


Figura 4.13 – Conteúdo de umidade em função do $\text{Ln}(x/\text{Raio})$ para $Q = 80 \text{ W/m}$

Após analisar os diferentes gráficos para as diversas combinações de potência dissipada nos cabos e conteúdo inicial de umidade, apresentados no final da subseção 4.2.1, observa-se que todos os resultados obtidos para os dois cabos foram bastante próximos. Isto permite concluir que a simplificação proposta por Gauthier *et alli*, 1997, pode ser estendida à substituição de cabos de seção transversal circular por cabos de seção transversal quadrada de área equivalente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados das simulações realizadas para os quatro modelos computacionais investigados neste trabalho. A apresentação dos resultados é realizada através de quatro diferentes tipos de análise; primeiramente, apresenta-se a análise da seleção de valores recomendados para os parâmetros em função do calor volumétrico armazenado no solo para o caso de um duto isolado. O segundo tipo de resultado compara o calor volumétrico armazenado no solo obtido empregando a resolução acoplada de energia e massa para o modelo de um duto isolado, tanto com aquele encontrado utilizando a resolução da equação da temperatura para este modelo como para os demais modelos analisados. O terceiro tipo de resultado mostra as evoluções da temperatura e do conteúdo de umidade em função do tempo e da distância axial z . O quarto e último tipo de resultado apresenta os campos tridimensionais de temperatura e de conteúdo de umidade dos quatro modelos computacionais analisados.

5.1 Seleção de valores recomendados para os parâmetros do modelo de um duto isolado

Visando melhorar o sistema de troca térmica dos modelos computacionais investigados e aumentar, assim, o calor volumétrico armazenado no solo, será efetuada a seleção dos denominados valores recomendados para os parâmetros do modelo de um duto isolado. Em todas as simulações realizadas nesta análise é empregada uma malha uniformemente distribuída de $45 \times 45 \times 20$ volumes de controle, um passo temporal de 300 segundos e uma condição de contorno periódica para simular as variações de temperatura do escoamento na entrada do duto, a qual é dada pela senóide apresentada na Figura 4.1.

A análise dos resultados apresentados nesta seção objetiva identificar valores (ou intervalos de valores) dos parâmetros do modelo de um duto isolado, que permitam melhorar a eficiência do sistema de troca térmica deste modelo. Estes valores são denominados de valores (ou intervalos de valores) recomendados para os parâmetros, sendo que, uma vez identificados, eles serão utilizados, também, nas simulações dos demais modelos avaliados neste trabalho. Os parâmetros para os quais são determinados os valores (ou intervalos de valores) recomendados são: a velocidade do fluxo de ar dentro do duto, o conteúdo de umidade do solo, o diâmetro e o comprimento do duto e a distância entre centros dos dutos, sendo que este último parâmetro representa, também, o lado externo do solo, d , mostrado na Figura 3.7.

São dois os critérios adotados na escolha dos valores (ou intervalos de valores) recomendados para os parâmetros analisados. Ambos os critérios são fundamentados na

inclinação dos segmentos de reta, que formam as curvas representativas da variação do calor volumétrico armazenado no solo em função dos valores destes parâmetros. O primeiro critério é baseado na maior inclinação positiva (ou negativa) em relação à linha horizontal dos segmentos de reta que unem dois pontos consecutivos das curvas representativas da variação do calor volumétrico armazenado no solo. Após a identificação do segmento com maior inclinação relativa positiva (ou negativa), escolhe-se o segundo ponto deste segmento caso ele tenha inclinação positiva ou o primeiro ponto se o segmento tiver inclinação negativa. A escolha do segundo ponto quando o segmento de reta tiver inclinação positiva deve-se ao fato de que, quanto maior for o valor do parâmetro considerado, maior será a eficiência do sistema de troca térmica do modelo em questão e, conseqüentemente, mais calor volumétrico será acumulado no solo. Em contraste, quando a inclinação do segmento for negativa, o primeiro ponto deste segmento será escolhido por representar uma maior eficiência do sistema de troca térmica do modelo considerado. Por simplicidade, a partir de agora este primeiro critério será denominado de critério da melhor taxa.

O segundo critério de escolha dos valores (ou intervalos de valores) recomendados para os parâmetros analisados, é fundamentado no conceito de taxa de crescimento (segmento com inclinação positiva) ou decréscimo do calor volumétrico armazenado no solo em função da variação dos valores destes parâmetros. Este critério visa identificar um valor do parâmetro avaliado que divida a curva representativa em duas regiões. Assim, o valor recomendado para o parâmetro será o divisor entre regiões com taxas de crescimentos (ou decréscimos) forte e moderado ou entre regiões com taxas de crescimentos (ou decréscimos) moderado e fraco. Conseqüentemente, este segundo critério será denominado de critério da taxa de separação. A seguir, os resultados para os quatro parâmetros investigados serão apresentados separadamente.

5.1.1 Calor volumétrico armazenado em função da velocidade do escoamento

As Figuras 5.1 a 5.4 apresentam os resultados de 60 simulações do modelo de um duto isolado com diâmetro de 0,1 m, para um conteúdo de umidade do solo envolvente de 0,25. Estas quatro figuras mostram o calor volumétrico armazenado no solo durante um ciclo de 24 horas em função da velocidade de escoamento do ar dentro do duto para diferentes combinações entre os parâmetros comprimento e distância entre centros dos dutos. Os seguintes valores para estes parâmetros são utilizados: comprimento do duto: 5, 10, 20 e 30 metros; distâncias entre centros dos dutos: 0,2, 0,25 e 0,3 m e velocidade do escoamento interno de ar: 2, 4, 6, 8 e 10 m/s.

A Figura 5.1 apresenta os valores do calor volumétrico armazenado no solo para cada combinação de parâmetros e para um duto de 5 metros de comprimento. Objetivando tornar mais clara a construção das figuras desta análise, são indicados, na curva correspondente à menor distância entre centros, os valores do calor volumétrico armazenado para as diferentes velocidades do escoamento. Aplicando-se o critério da melhor taxa nas curvas desta figura, tem-se que o valor de velocidade de escoamento de 4 m/s é escolhido, ou seja, este valor será o denominado valor recomendado da velocidade de escoamento considerando um duto com 5 metros de comprimento e as distâncias entre centros avaliadas. Finalmente, ressalta-se que, conforme pode ser observado, o crescimento logarítmico do calor volumétrico armazenado, em função do aumento da velocidade do escoamento, é fortemente acentuado para aqueles dutos onde as distâncias entre centros se tornam menores. O contrário também é verdadeiro: à medida que as distâncias entre centros se tornam maiores as curvas logarítmicas são linearizadas, ou seja, as curvas assumem formas mais próximas de linhas retas.

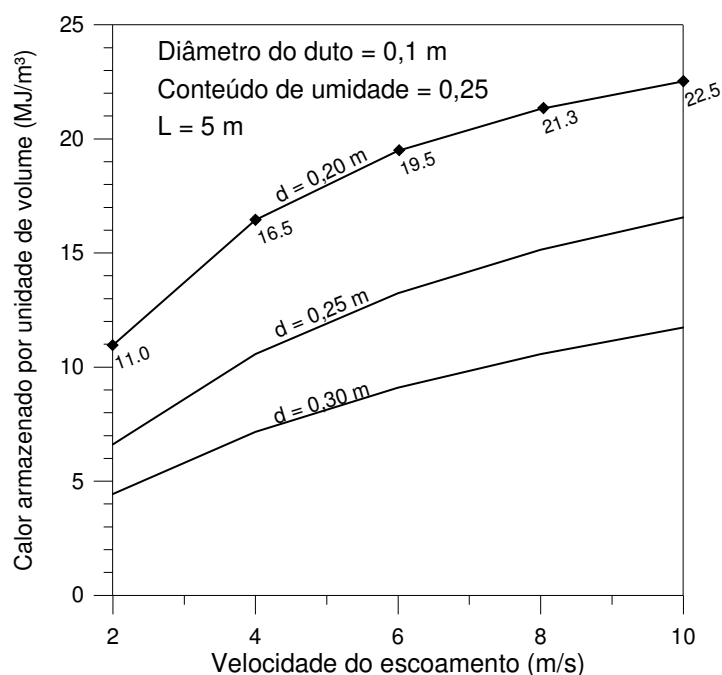


Figura 5.1 – Calor volumétrico armazenado em função da velocidade de escoamento do ar para um comprimento de 5 m e diferentes distâncias entre centros

As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 mostram o calor volumétrico armazenado no solo para comprimentos de 10, 20 e 30 metros, respectivamente. Aplicando-se o critério da melhor taxa nestas figuras, concluí-se que 4 m/s, também, será o valor recomendado da velocidade de escoamento empregando os comprimentos de 10, 20 e 30 metros.

Uma visão conjunta das Figuras 5.1 a 5.4 permite verificar que ao aumentar o comprimento do duto ocorre uma progressiva linearização das curvas logarítmicas que compõem

cada figura. Desta forma, para grandes comprimentos dos dutos, as curvas logarítmicas tendem para retas, impossibilitando determinar qual segmento apresenta maior inclinação, conseqüentemente, a aplicação do critério da melhor taxa. Este fato pode ser bem observado na Figura 5.4, onde a determinação de um valor recomendado da velocidade do escoamento é de difícil visualização, visto que a diferença de inclinação entre os segmentos de reta, que compõem cada curva, é muito pequena.

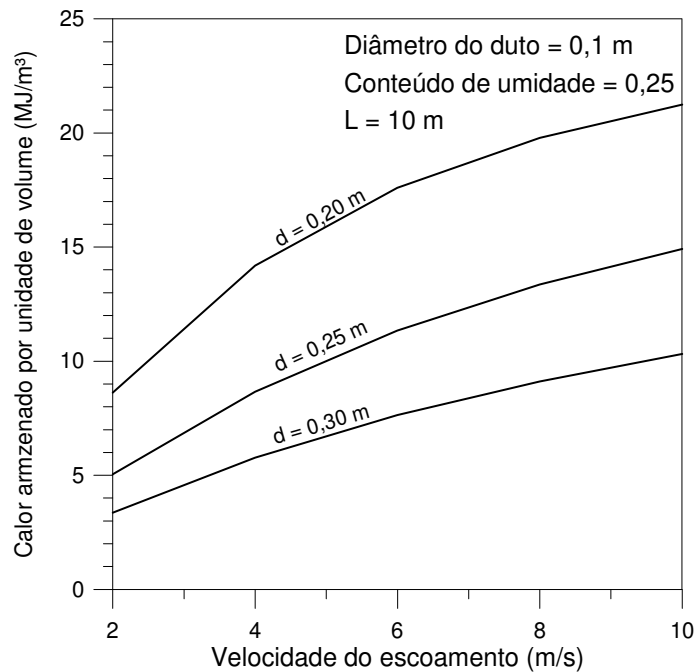


Figura 5.2 – Calor volumétrico armazenado em função da velocidade de escoamento do ar para um comprimento de 10 m e diferentes distâncias entre centros

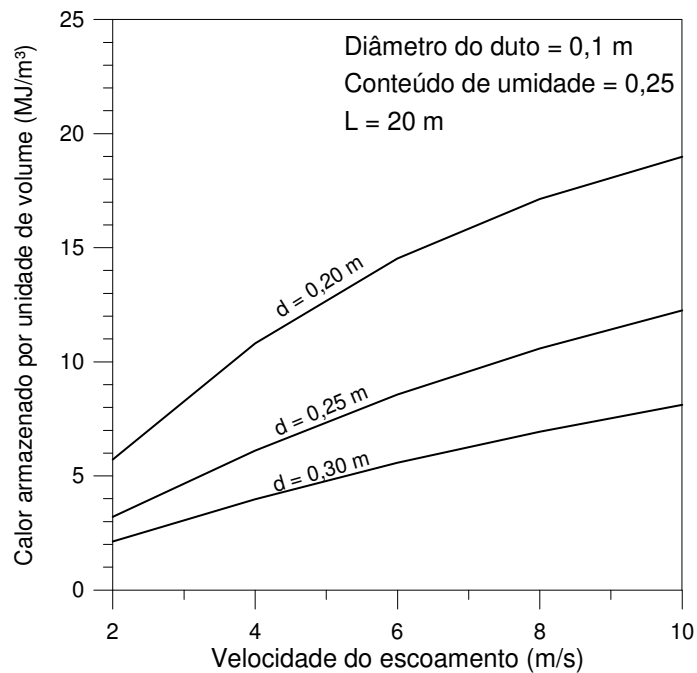


Figura 5.3 – Calor volumétrico armazenado em função da velocidade de escoamento do ar para um comprimento de 20 m e diferentes distâncias entre centros

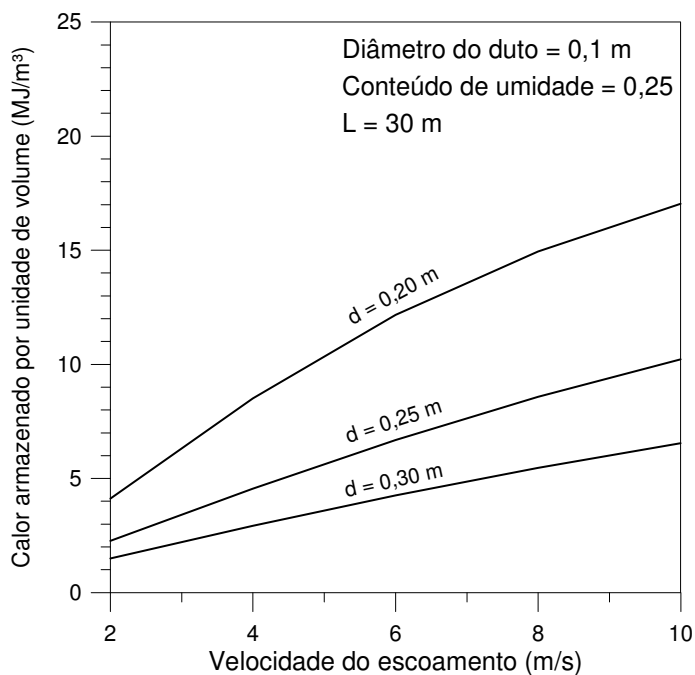


Figura 5.4 – Calor volumétrico armazenado em função da velocidade de escoamento do ar para um comprimento de 30 m e diferentes distâncias entre centros

Gauthier *et alli*, 1997, usando os mesmos parâmetros em um modelo semelhante de um duto isolado, também chegaram ao valor recomendado de 4 m/s para a velocidade de escoamento do ar dentro do duto. Os autores afirmam que o ganho de calor volumétrico armazenado no solo gerado pelo aumento da velocidade do escoamento acima de 4 m/s é rapidamente contrabalançado pelo crescimento substancial da potência do sopro, sendo que esta potência é proporcional ao quadrado da velocidade do escoamento. Assim, tendo em vista os resultados anteriores, que identificam 4 m/s como sendo a velocidade do escoamento recomendada, esta velocidade será adotada em todas as simulações realizadas nos quatro modelos abordados pelo presente trabalho.

5.1.2 Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade

Neste estudo é apresentado, através das Figuras 5.5 a 5.8, o calor volumétrico armazenado no solo em função do conteúdo de umidade. Estas figuras reúnem os resultados de 120 simulações realizadas no modelo de um duto isolado, considerando um diâmetro de 0,1 m e empregando uma velocidade de escoamento interno do ar de 4 m/s. Da mesma forma como foi visto no estudo precedente, as três curvas que compõem as Figuras 5.5 a 5.8 são resultantes da combinação de um comprimento (5, 10, 20 ou 30 metros) com as distâncias entre centros de 0,2, 0,25 e 0,3 m.

Aplicando-se o critério da melhor taxa nas três curvas na Figura 5.5, onde o

comprimento do duto é de 5 metros, observa-se que, entre os valores de conteúdo de umidade destacados por pontos nestas curvas, o conteúdo de umidade com um valor de 0,20 seria escolhido, pois os segmentos de retas com as maiores inclinações ocorrem para conteúdos de umidade com valores entre 0,15 e 0,20.

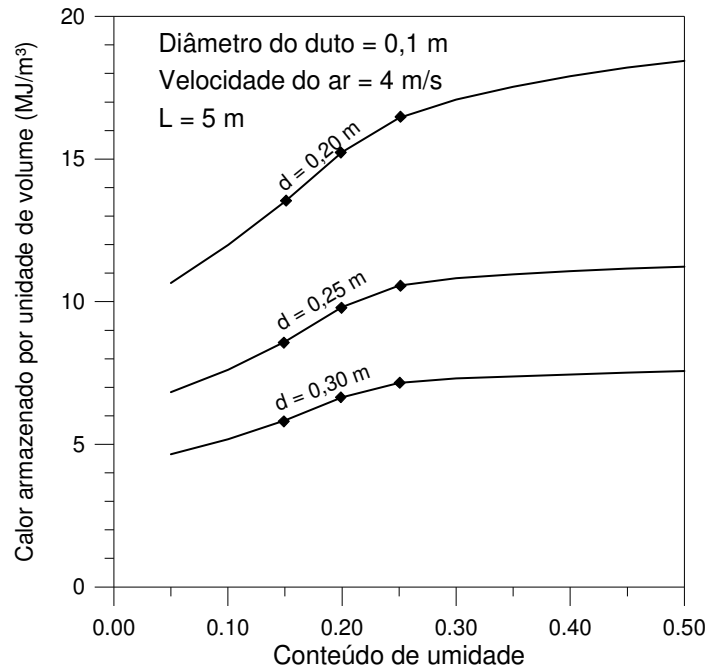


Figura 5.5 – Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para um comprimento do duto de 5 m e várias distâncias entre centros

As Figuras 5.6 a 5.8 apresentam o calor volumétrico armazenado no solo do modelo de um duto isolado considerando, respectivamente, os comprimentos de 10, 20 e 30 metros. Todas as curvas destas figuras permitem verificar que, também, para estes comprimentos avaliados, o segmento de reta com maior inclinação é aquele correspondente a valores do conteúdo de umidade entre 0,15 e 0,20. Desta forma, se o critério da melhor taxa for utilizado, o valor do conteúdo de umidade a ser escolhido como recomendado seria 0,20. Entretanto, considerando o formato das curvas que compõem as figuras anteriores, devem ser levados em conta fatores complementares, que ajudarão na escolha do valor do conteúdo de umidade recomendado. O principal fator a ser levado em consideração é que, em praticamente todas as curvas dos gráficos analisados, o segmento de reta com a segunda inclinação mais elevada é aquele correspondente a valores do conteúdo de umidade entre 0,20 e 0,25, como mostra os pontos das curvas da Figura 5.5. Assim, se a decisão for optar por utilizar o segmento de reta com a segunda inclinação mais elevada, o valor 0,25 será escolhido. Ainda, se for empregado o critério da taxa de separação nas curvas das Figuras 5.5 e 5.6, verifica-se que o conteúdo de umidade de 0,25 será escolhido como valor recomendado, uma vez que este valor representa um divisor entre taxas de crescimento forte e de taxas de crescimento fraco a

moderado do calor volumétrico armazenado no solo.

Aplicando-se o critério da taxa de separação nas curvas das Figuras 5.7 e 5.8, que correspondem, respectivamente, aos comprimentos do duto de 10 e 20 metros, observa-se que o valor do conteúdo de umidade de 0,25, também será selecionado, porque este valor é o divisor entre taxas de crescimento fraco a moderado do calor volumétrico armazenado no solo e de taxas de crescimento praticamente nulas. O comportamento das taxas de crescimento do calor volumétrico armazenado no solo para valores de conteúdo de umidade maiores que 0,25 indica que a partir deste valor o calor trocado passa a ser praticamente independente desta variável. Gauthier *et alli*, 1997, ao realizar o estudo de um modelo similar de um duto isolado utilizando solo seco e com conteúdos de umidade de 0,25 e 0,45, afirmaram que quando o conteúdo de umidade é aumentado tem-se um acréscimo no calor volumétrico armazenado no solo, mas seus efeitos tornam-se quase imperceptíveis para grandes comprimentos ($L \geq 20$ metros) e velocidades de escoamento de 4 m/s ou menores. A afirmação anterior indica que os autores já previram a independência do calor volumétrico armazenado no solo em relação ao acréscimo do conteúdo de umidade a partir de um certo nível. Levando em conta que o conteúdo de umidade de 0,25 foi selecionado pelo critério da taxa de separação e o fato dele ser o valor limite a partir do qual o calor volumétrico armazenado no solo passa a ser independente desta variável, este valor é escolhido como sendo o valor recomendado do conteúdo de umidade. Sendo assim, a partir de agora, este valor recomendado será empregado nas simulações dos restantes casos analisados pelo presente trabalho.

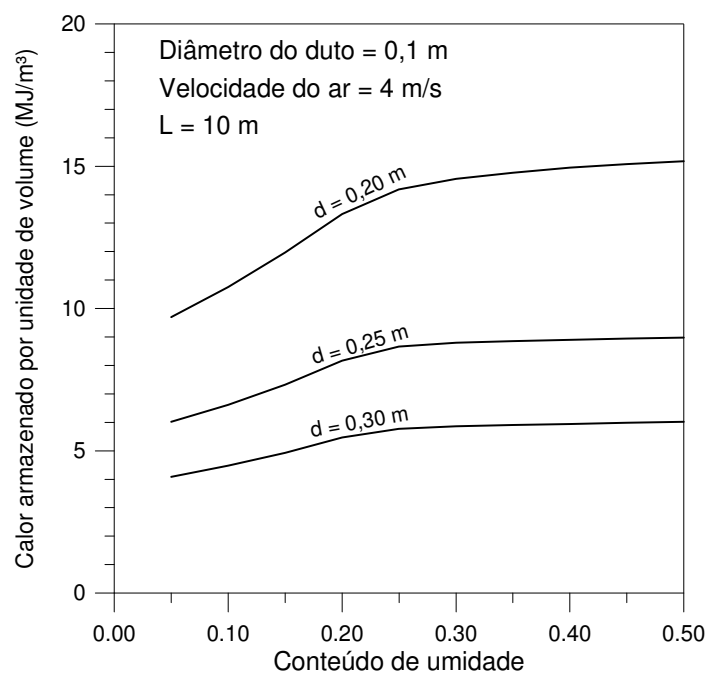


Figura 5.6 – Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para um comprimento do duto de 10 m e várias distâncias entre centros

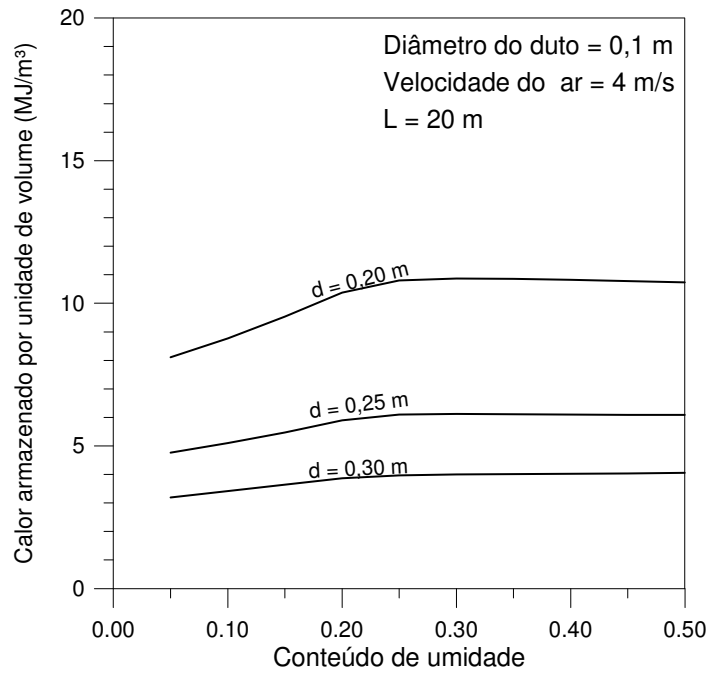


Figura 5.7 – Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para um comprimento do duto de 20 m e várias distâncias entre centros

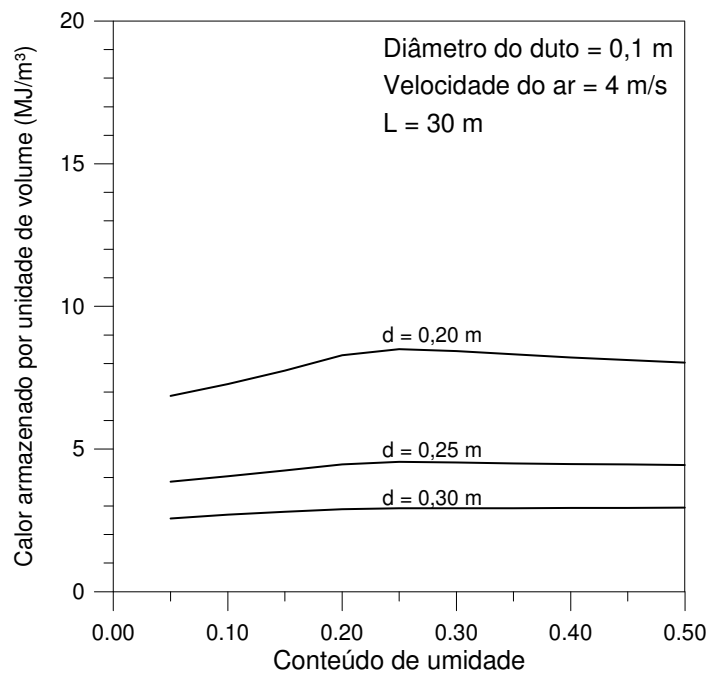


Figura 5.8 – Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para um comprimento do duto de 30 m e várias distâncias entre centros

Uma visão conjunta das Figuras 5.5 a 5.8 permite reforçar a afirmação de que, para qualquer comprimento do duto e considerando distâncias entre centros de 0,25 m, ou maiores, o calor volumétrico armazenado no solo torna-se, praticamente, independente do conteúdo de umidade, quando este último aumenta acima de 0,25.

5.1.3 Calor volumétrico armazenado em função do comprimento do duto

As Figuras 5.9 a 5.11, que reúnem 126 simulações realizadas no modelo de um duto isolado, apresentam o calor volumétrico armazenado no solo em função do comprimento do duto, L , para os diâmetros de 0,1, 0,15 e 0,2 m.

Na Figura 5.9, onde o diâmetro do duto é de 0,1 m, observa-se que as maiores inclinações dos segmentos de retas, destacados pelos pontos nas curvas, ocorrem para valores de comprimento do duto entre 1 e 5 metros. Assim, empregando o critério da melhor taxa o valor de 1 metro seria selecionado como recomendado. Entretanto, como na prática os sistemas trocadores-armazenadores de calor comerciais utilizam comprimentos maiores do que 5 metros, este critério tem uma influência moderada na escolha do intervalo de comprimento recomendado. Por outro lado, aplicando o critério da taxa de separação o comprimento de 20 metros é escolhido como o limite superior do intervalo recomendado, visto que ele representa o divisor entre taxas de decréscimo moderado e fraco como verifica-se através do destaque destes pontos nas curvas correspondente às distâncias entre centros de até 0,30 m. Portanto, para o caso de um duto com 0,1 m de diâmetro, escolhe-se os comprimentos de 5 e 20 metros como sendo os limites do intervalo recomendado para este diâmetro. Gauthier *et alli*, 1997, analisando um modelo semelhante de um duto isolado com um diâmetro de 0,108 m, chegaram a um resultado similar ao afirmar que tubos com mais de 20 metros são denominados de dutos de grandes comprimentos.

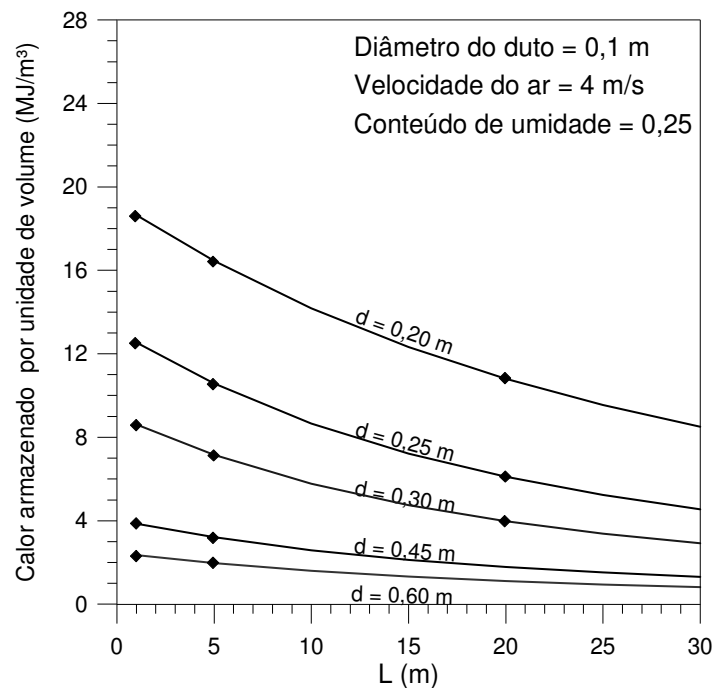


Figura 5.9 – Calor volumétrico armazenado em função do comprimento do duto para um diâmetro de 0,1 m e várias distâncias entre centros

Nas Figuras 5.10 e 5.11, onde o diâmetro do duto é de 0,15 e 0,2 m, respectivamente, verifica-se que o aumento do diâmetro provocou uma linearização no conjunto de curvas logarítmicas, sendo que esta linearização cresce à medida que o diâmetro do duto aumenta. A observação em separado de cada uma destas figuras mostra que a linearização do conjunto de curvas de cada figura se acentua à medida que as distâncias entre centros aumentam. Isto é melhor visualizado nas curvas logarítmicas correspondentes a distância entre centros de 0,45 e 0,60 m, que são praticamente linhas retas.

A Figura 5.10 permite observar que para os comprimentos avaliados, mesmo considerando somente as curvas correspondentes às distâncias entre centros até 0,35 m, é difícil definir um valor de comprimento que separe taxas de decréscimos moderado e fraco. Assim, para um duto com diâmetro de 0,15 m e considerando os comprimentos avaliados não é possível escolher um valor exato para o limite superior do intervalo recomendado usando o critério da taxa de separação.

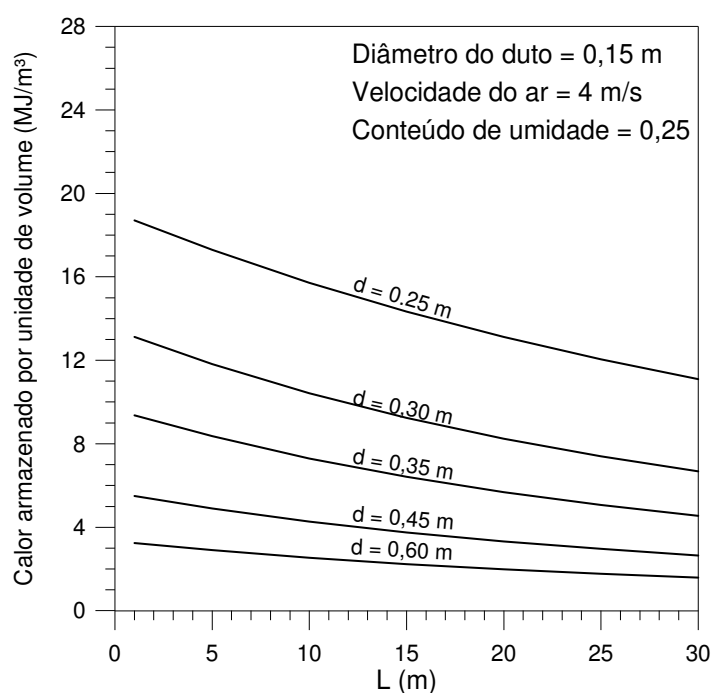


Figura 5.10 – Calor volumétrico armazenado em função do comprimento do duto para um diâmetro de 0,15 m e várias distâncias entre centros

Comparando as Figuras 5.9 e 5.10, observa-se que o aumento do diâmetro do duto produziu uma maior linearização em todas as curvas desta última figura. Se a esta maior linearização for somada à conseqüente falta de um valor de comprimento que separe taxas de decréscimos moderado e fraco, conclui-se que o acréscimo no diâmetro do duto produz um aumento no limite superior do intervalo dos comprimentos recomendados. Isto é explicado

pelo incremento da área superficial de troca térmica, que é proporcional ao quadrado do diâmetro do duto.

Analisando a Figura 5.11, chega-se a uma conclusão semelhante à da situação anterior, pois neste caso as curvas correspondentes às distâncias entre centros até 0,40 m não permitem determinar um valor de comprimento que separe taxas de decréscimos moderado e fraco, salientando que neste caso as curvas logarítmicas se aproximam mais de linhas retas que as da situação precedente.

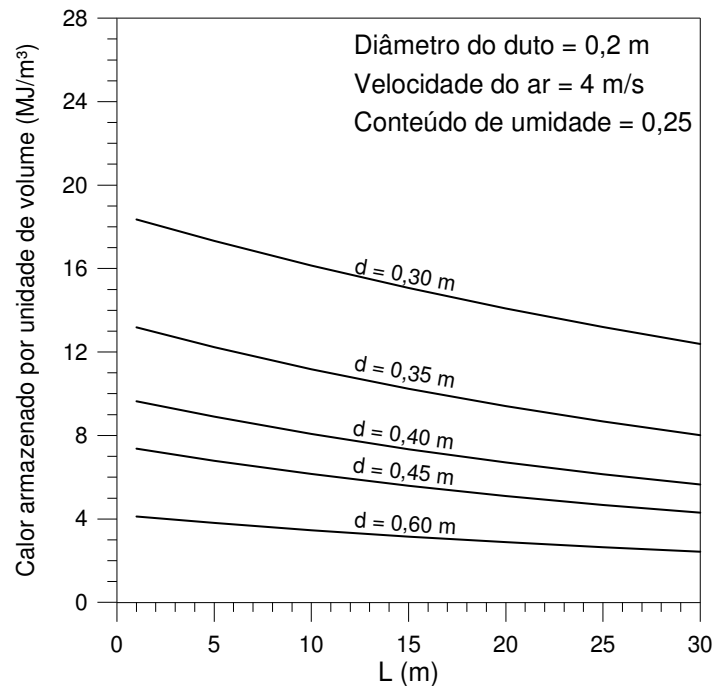


Figura 5.11 – Calor volumétrico armazenado em função do comprimento do duto para um diâmetro de 0,2 m e várias distâncias entre centros

A observação conjunta das Figuras 5.9 a 5.11 permite verificar que, à medida que o diâmetro do duto aumenta, há uma intensificação na linearização de cada uma das curvas logarítmicas destas figuras e, conseqüentemente, uma maior dificuldade de identificar o divisor de taxas de decréscimos moderado e fraco, que seria o limite superior do intervalo dos comprimentos recomendados. Desta forma, conclui-se que um acréscimo no diâmetro do duto aumenta o limite superior do intervalo de valores recomendados do comprimento deste duto.

Finalmente, é importante ressaltar que o valor do comprimento do duto de 20 metros, escolhido como sendo o limite superior do intervalo recomendado para o diâmetro de 0,1 m, representa um limite superior apropriado para que o desempenho do modelo não diminua significativamente, visto que na prática o comprimento ótimo de qualquer dos modelos analisados é sempre o menor possível.

5.1.4 Calor volumétrico armazenado em função da distância entre centros dos dutos

A Figura 5.12, que reúne 81 simulações realizadas no modelo de um duto isolado, apresenta o calor volumétrico armazenado no solo em função da distância entre centros, d , considerando a combinação entre diâmetros de 0,1, 0,15 ou 0,2 m com comprimentos de 5, 10 e 20 metros. As curvas logarítmicas apresentadas nesta figura são divididas em três conjuntos, um para cada diâmetro analisado. Observando o primeiro conjunto de curvas, aquele correspondente a um diâmetro de 0,1 m, verifica-se que as três curvas logarítmicas deste conjunto decrescem fortemente à medida que a distância entre centros aumenta, sendo que este decréscimo é menos acentuado (menores inclinações dos segmentos de reta) a partir de valores maiores que 0,3 m. Para o segundo conjunto de curvas, que corresponde a um diâmetro de 0,15 m, o comportamento é semelhante à situação precedente; entretanto, neste caso, as três curvas logarítmicas decrescem fortemente até uma distância entre centros de 0,35 m e, a partir deste valor, o decréscimo é menos acentuado. Por último, o comportamento do terceiro conjunto de curvas, correspondente ao diâmetro de 0,2 m, é também similar aos dois anteriores, com a particularidade de que o decréscimo acentuado das curvas logarítmicas ocorre até distância entre centros de 0,4 m e, a partir deste valor, o decréscimo é, também, menos acentuado.

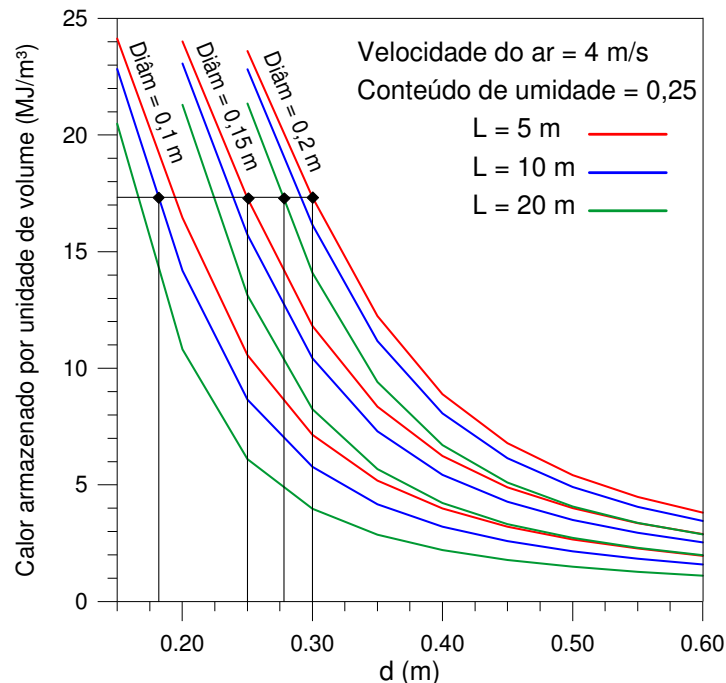


Figura 5.12 – Calor volumétrico armazenado em função da distância entre centros dos dutos para diferentes diâmetros e comprimentos de 5, 10 e 20 m

A aplicação do critério da taxa de separação nos três conjuntos de curvas da Figura 5.12 leva a concluir que, a cada diâmetro do duto avaliado corresponde um intervalo de

distâncias entre centros considerado recomendado. Assim, para os dutos com diâmetros de 0,1, 0,15 e 0,2 m os intervalos com valores de distâncias entre centros de até 0,30, 0,35 e 0,40 m, respectivamente, são considerados intervalos recomendados. De forma análoga ao estudo do calor volumétrico armazenado em função do comprimento, é importante ressaltar que estes limites superiores dos intervalos de valores recomendados são apropriados para que o rendimento modelo não decaia significativamente, já que na prática a distância entre centros ótima para qualquer diâmetro do duto e modelo considerado é sempre a menor possível.

Uma consequência da seleção dos valores recomendados para a distância entre centros é a afirmação de que sempre é possível obter uma quantidade equivalente de calor volumétrico armazenado no solo considerando dutos com o mesmo diâmetro ou com diferentes diâmetros. Para que isto seja possível basta variar, de forma conveniente, o comprimento e/ou as distâncias entre centros dos dutos. Os valores equivalentes do calor volumétrico armazenado no solo podem ser representados graficamente através de uma reta horizontal. As diferentes distâncias entre centros, que geram o mesmo calor volumétrico armazenado para as diferentes curvas, são encontradas no eixo das abscissas, através de retas verticais que passam pelos pontos de intersecção entre as diferentes curvas e a reta horizontal. Na figura 5.12 as retas verticais pontilhadas representam algumas das alternativas que geram calores volumétricos equivalentes armazenados no solo. Por exemplo, fixando um valor do calor volumétrico armazenado no solo de $17,33 \text{ MJ/m}^3$, verifica-se, conseqüentemente, os valores dos parâmetros que definem algumas das alternativas que geram o mesmo calor volumétrico armazenado no solo, os quais correspondem a: diâmetro de 0,2 m, comprimento de 5 metros e distância entre centros de 0,3 m; diâmetro de 0,2 m, comprimento de 20 metros e distância de 0,278 m; diâmetro de 0,15 m, comprimento de 5 metros e distância de 0,25 m e, por último, diâmetro de 0,1 m, comprimento de 10 metros e distância entre centros de 0,182 m e assim por diante. Em particular, usando valores convenientes de distância entre centros, é possível obter a mesma quantidade de calor volumétrico armazenado no solo dividindo pela metade o diâmetro e o comprimento do duto (ou duplica-los), como será discutido na próxima seção.

A observação de cada conjunto de curvas da Figura 5.12 permite verificar que, para um mesmo diâmetro, as curvas logarítmicas mais afastadas em relação ao eixo das abscissas correspondem a dutos com comprimentos menores. Esta verificação permite concluir que, para um mesmo diâmetro e mesma distância entre centros, os valores de calor volumétrico armazenado no solo serão sempre maiores para aqueles dutos com comprimentos menores. Isto se deve ao fato de que a troca térmica entre o escoamento do ar e solo envolvente decresce logaritmicamente ao longo do duto e, conseqüentemente, o calor volumétrico armazenado em todo o duto diminui.

5.2 Combinações de parâmetros que produzem calores volumétricos equivalentes armazenados no solo

A presente análise visa propor alternativas para contornar eventuais restrições impostas pelas dimensões físicas do sistema trocador-armazenador de calor, de forma a reproduzir o mesmo calor volumétrico armazenado no solo em função do conteúdo de umidade, que foi representado pelas curvas das Figuras 5.5 a 5.7 da subseção 5.1.2. Adotando os comprimentos 5, 10 e 20 metros apresentados naquelas figuras como valores recomendados, propõe-se modelos de um duto isolado que possuam comprimentos que sejam a metade ou o dobro destes valores recomendados, mas utilizando diâmetros de 0,05 m ou de 0,20 m. Para facilitar a compreensão, cada uma das três curvas que compõem aquelas figuras são denominadas de curvas de calor volumétrico equivalente armazenado no solo em função do conteúdo de umidade. Assim, as três curvas de calor volumétrico equivalente que formam a Figura 5.5, são resultantes da combinação de um diâmetro de 0,1 m, uma velocidade de escoamento de 4 m/s e de um comprimento recomendado de 5 m com as distâncias entre centros de 0,20 , 0,25 e 0,30 m. Por sua vez, as curvas de calor volumétrico equivalente armazenado no solo que compõem a Figura 5.6, são produzidas pela combinação de um comprimento recomendado de 10 m com os mesmos valores dos demais parâmetros empregados na situação precedente. A Figura 5.7 apresenta as curvas de calor volumétrico equivalente armazenado no solo geradas pela combinação de um comprimento recomendado de 20 m com os mesmos valores dos parâmetros utilizados nas duas situações anteriores.

As Figuras 5.13 a 5.15 reúnem os resultados de 270 simulações realizadas para determinar o calor volumétrico equivalente armazenado pelo modelo de um duto isolado em função do conteúdo de umidade do solo. Cada uma destas figuras é composta por três conjuntos de três curvas. Por sua vez, cada conjunto de curvas é formado por uma curva de calor volumétrico equivalente armazenado no solo (definida no parágrafo precedente) e outras duas curvas que contêm valores que correspondem à metade e ao dobro dos comprimentos recomendados combinados, respectivamente, com diâmetros de 0,05 m e de 0,20 m, que também representam a metade e o dobro do diâmetro utilizado nas curvas de calor volumétrico equivalente armazenado no solo. Para facilitar a identificação, tanto as curvas como as legendas, que indicam as combinações dos diferentes parâmetros como diâmetro, D , comprimento, L , e distância entre centros, d , são plotadas na mesma cor. Por exemplo, as curvas de calor volumétrico equivalente armazenado no solo das Figuras 5.13 a 5.15, assim como as correspondentes legendas são plotadas na cor vermelha.

Na Figura 5.13, verifica-se que para cada curva de calor volumétrico equivalente

armazenado no solo correspondente às diferentes distâncias entre centros analisadas há outras duas curvas coincidentes. Para a curva de calor volumétrico equivalente armazenado no solo associada à distância entre centros de 0,20 m, tem-se as duas curvas produzidas pelas combinações de um comprimento de 2,5 m, um diâmetro de 0,05 m com uma distância entre centros de 0,142 m e de um comprimento de 10 m, um diâmetro de 0,2 m com uma distância entre centros de 0,298 m. Para cada uma das outras duas curvas de calor volumétrico equivalente armazenado no solo mostradas nesta figura existem também duas curvas coincidentes para todos os níveis de umidade avaliados.

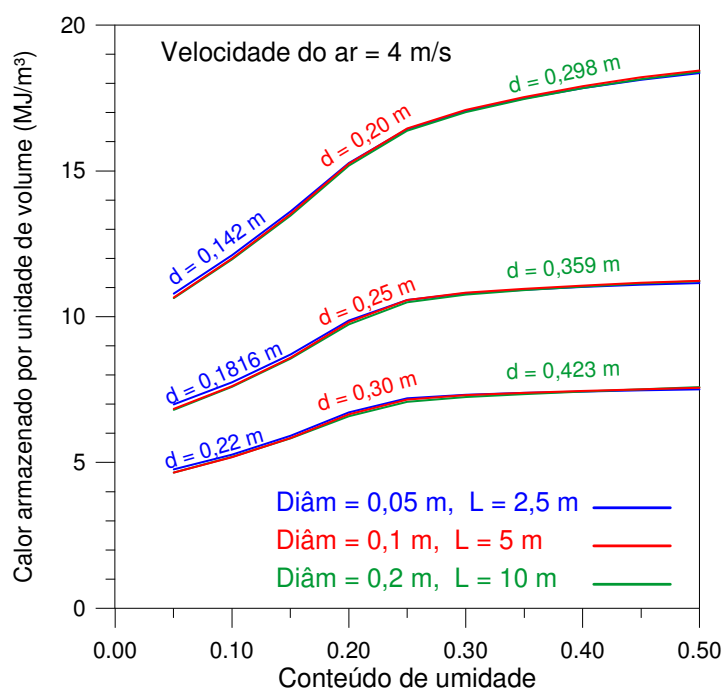


Figura 5.13 – Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para diferentes diâmetros, distâncias entre centros e comprimento de 2,5, 5 e 10 m

Na Figura 5.14 observa-se, também, que para cada uma das curvas de calor volumétrico equivalente armazenado no solo, há outras duas curvas praticamente coincidentes para todos os níveis de umidade analisados. Assim, para a curva de calor volumétrico equivalente armazenado no solo correspondente a uma distância entre centros de 0,25 m, tem-se as curvas geradas pelas combinações de um comprimento de 5 m, um diâmetro de 0,05 m com uma distância entre centros de 0,1796 m; e por um comprimento de 20 m, um diâmetro de 0,2 m com uma distância entre centros de 0,3612 m.

De forma análoga às duas figuras anteriores, cada uma das três curvas de calor volumétrico equivalente armazenado no solo da Figura 5.15, apresentam outras duas curvas praticamente coincidentes para a maioria dos níveis de umidade investigados. Por exemplo, para

a curva de calor volumétrico equivalente armazenado no solo associada a uma distância entre centros de 0,30 m, tem-se as curvas produzidas pelas combinações de um comprimento de 10 m, um diâmetro de 0,05 m com uma distância entre centros de 0,2126 m; e por um comprimento de 40 m, um diâmetro de 0,2 m com uma distância entre centros de 0,434 m.

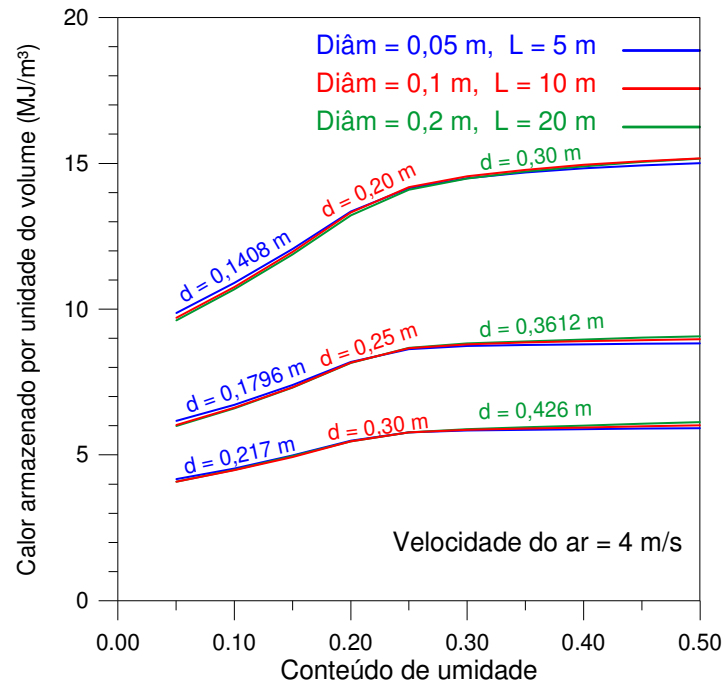


Figura 5.14 – Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para diferentes diâmetros, distâncias entre centros e comprimento de 5, 10 e 20 m

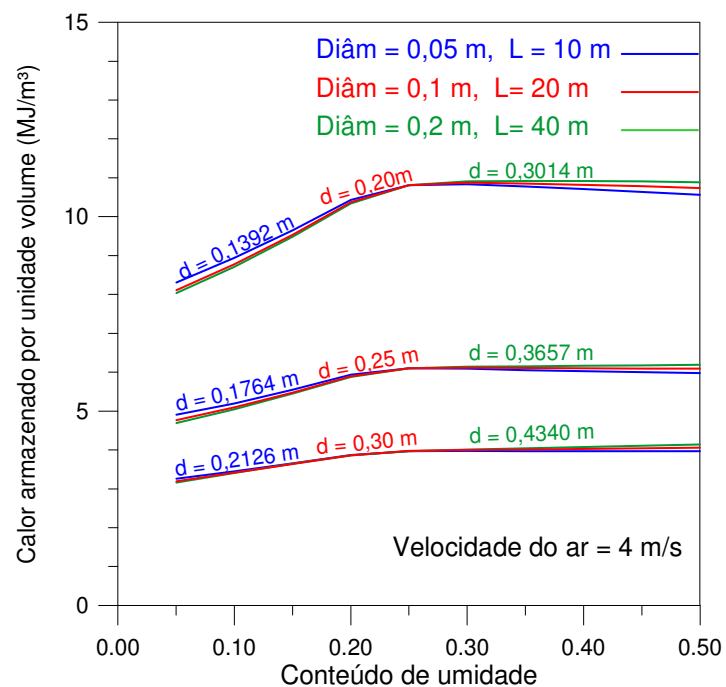


Figura 5.15 – Calor volumétrico armazenado em função do conteúdo de umidade do solo para diferentes diâmetros, distâncias entre centros e comprimento de 10, 20 e 40 m

Da análise das Figuras 5.13 a 5.15 pode-se concluir que, se no dimensionamento do modelo de um duto isolado, que também pode ser estendido para um sistema trocador-armazenador de calor no solo, existir alguma restrição quanto o uso de um determinado comprimento recomendado do duto, as alternativas para obter-se calor volumétrico equivalente armazenado no solo para praticamente todos os níveis de umidade avaliados são: dividir pela metade o comprimento recomendado e o diâmetro do duto do modelo (ou duplicá-los) e adotar uma distância entre centros conveniente.

A seguir é apresentado um estudo de comparação entre os calores volumétricos armazenados no solo obtidos utilizando a resolução acoplada de energia e umidade e a resolução da equação do calor.

5.3 Comparação entre os calores volumétricos armazenados obtidos utilizando a resolução acoplada de calor e umidade e aqueles encontrados empregando a resolução da equação da energia

Nesta seção é apresentada a comparação entre os calores volumétricos armazenados no solo obtidos empregando a resolução acoplada de energia e umidade e aqueles conseguidos aplicando a resolução, somente, da equação da temperatura para um modelo de um duto isolado. Na seqüência é apresentada e analisada a comparação entre os calores volumétricos armazenados pelos diferentes modelos avaliados considerando as situações mais significativas.

5.3.1 Calores volumétricos armazenados pelo modelo de um duto isolado

A análise apresentada a seguir tem por objetivo verificar a necessidade de uma resolução simultânea do processo de transferência de calor e umidade no solo em comparação com a resolução apenas do problema térmico. Esta análise é realizada com vistas à quantificação do valor da parcela correspondente ao calor que é transportado em decorrência dos gradientes de umidade. Gauthier, 1994, conduziu uma análise dimensional do processo de transferência de calor em solos que sofrem uma variação de temperatura de até 10 °C por um período de 24 horas e concluiu que os fluxos de umidade contribuem com menos de 0,1% do calor total transferido no solo. Esta é a principal justificativa usada por Gauthier *et alli*, 1997, para não incluir o acoplamento da umidade no estudo do sistema trocador-armazenador de calor no solo. Puri, 1986, também chegou à conclusão de que os movimentos de umidade produzem pequenos

efeitos na transferência de calor nos solos porque a difusividade térmica dos solos mostra pequenas variações com o conteúdo de umidade. Nestes modelos, as diferentes contribuições, correspondentes a cada um dos diversos níveis iniciais de conteúdo de umidade, são incluídas através do pré-cálculo da condutividade térmica do meio poroso, sendo que o valor encontrado para a condutividade térmica permanecerá constante durante toda a simulação. No entanto, nos modelos analisados por estes autores, a análise não considerou as equações governantes contendo as contribuições dos gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade colocadas explicitamente, principal característica do modelo de Philip e De Vries, 1957, utilizadas no presente trabalho. Assim sendo, a presente análise é mais completa do que a dos autores citados e, assim, mais conclusiva. Vale ressaltar, ainda, a inclusão na presente análise da variação das propriedades difusivas e termofísicas com a temperatura e com a umidade.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados de 18 simulações efetuadas em nove casos significativos, que utilizam os valores recomendados para os parâmetros obtidos na seção 5.1 deste capítulo. Todas as simulações foram realizadas usando $45 \times 45 \times 20$ volumes de controle e um passo temporal de 300 segundos. Os parâmetros comuns, empregados em todos os casos, foram: diâmetro do duto de 0,1 m, conteúdo de umidade de 0,25 e velocidade do ar dentro do duto de 4 m/s. Visando quantificar o valor da parcela correspondente ao calor transportado pela difusão da umidade, cada um dos nove casos foram simulados considerando dois tipos de resolução. No primeiro, os casos são simulados utilizando a resolução acoplada das equações da energia e da massa. Neste tipo de resolução emprega-se propriedades difusivas e termofísicas variáveis com a temperatura e com o conteúdo de umidade, ou seja, a cada iteração todas as propriedades são recalculadas para os novos valores de temperatura e conteúdo de umidade determinados no passo de tempo anterior. No segundo tipo de resolução, os casos são simulados resolvendo somente a equação da energia, sendo que, neste caso, todas as propriedades difusivas e termofísicas são variáveis somente com a temperatura.

Os diferentes casos apresentados na Tabela 5.1 são decorrentes das combinações dos valores recomendados para os parâmetros comprimento e distância entre centros dos dutos. Na primeira coluna desta tabela são combinadas as distâncias entre centros de 0,20, 0,25 e 0,30 m com os comprimentos de 5, 10 e 20 metros. Para cada um destes comprimentos são considerados os dois tipos de resolução referidos no parágrafo precedente. A segunda e terceira colunas da tabela apresentam, respectivamente, o número de ciclos necessários para que o modelo torne-se periódico e o tempo consumido na simulação. A quarta coluna informa o tempo de simulação usado no cálculo do calor, ou seja, o tempo gasto na simulação de um novo ciclo após o modelo tornar-se periódico. É importante salientar que os tempos de simulação são incluídos na terceira e na quarta coluna da tabela com a finalidade de realizar comparações entre os diversos casos

analisados e, principalmente, em verificar o aumento do tempo de processamento no caso da resolução acoplada. Em todas as simulações foi utilizado um microcomputador Pentium IV de 2,66 GHz com 512 MB de memória DDR 400 MHz. Na quinta coluna, são apresentados os calores armazenados no solo por unidade de volume para os dois tipos de resolução simulados. A última coluna apresenta a variação percentual entre os calores volumétricos armazenados nos dois tipos de resolução analisados, ou seja, a solução acoplada do calor e da umidade e a resolução da equação da temperatura.

Tabela 5.1 – Comparação entre os calores volumétricos armazenados no solo para a resolução acoplada do calor e umidade e para a resolução de somente a equação da temperatura

Distância entre centros (d) e comprimento do duto (L)	Ciclos até periódico	Tempo de simul. até períod. (h)	Tempo de simul. p/o calc. d/calor (min)	Calor por volume (MJ/m ³)	Varição percentual
$d = 0,20$ m					
$L = 5$ m	Acoplada	5	5,3573	64,5543	0,00022%
	Só temp.	5	1,5215	18,3464	
$L = 10$ m	Acoplada	5	5,2121	61,8424	0,00022%
	Só temp.	5	1,4757	17,7176	
$L = 20$ m	Acoplada	6	5,7531	57,2678	0,00022%
	Só temp.	6	1,6737	16,7005	
$d = 0,25$ m					
$L = 5$ m	Acoplada	7	5,4519	46,4711	0,00025%
	Só temp.	7	1,6219	13,8629	
$L = 10$ m	Acoplada	8	5,9448	44,0322	0,00023%
	Só temp.	8	1,7539	13,1262	
$L = 20$ m	Acoplada	9	6,0189	39,6720	0,00021%
	Só temp.	9	1,8607	12,3004	
$d = 0,30$ m					
$L = 5$ m	Acoplada	10	5,9762	35,2929	0,00006%
	Só temp.	10	1,8632	11,0337	
$L = 10$ m	Acoplada	11	6,2426	33,4793	0,00003%
	Só temp.	11	1,9270	10,3808	
$L = 20$ m	Acoplada	13	6,6930	30,2337	0,00005%
	Só temp.	13	2,1042	9,5703	

Pela análise da Tabela 5.1, conforme consta na sexta coluna, observa-se que as diferenças percentuais entre os calores volumétricos armazenados no solo utilizando os dois tipos de resolução analisados não superam o valor de 0,00025%. Isto mostra que, em um modelo de um duto isolado submetido a uma variação periódica de temperatura de 14 °C, dada pela senóide apresentada na Figura 4.1, o valor da parcela correspondente ao calor transportado pela difusão da umidade é significativamente menor que o 0,1% alegado por Gauthier *et alli*, 1997. É importante ressaltar que, apesar das diferenças percentuais entre os calores volumétricos

armazenados no solo empregando os dois tipos de resolução serem insignificantes, elas apontam a sensibilidade da metodologia proposta ao resolver estes dois tipos de situações utilizando um critério de convergência de 10^{-7} .

Realizando-se uma síntese dos resultados correspondentes à aplicação de uma variação periódica da temperatura de 14 °C em um modelo de um duto isolado, apresentados na Tabela 5.1, pode-se concluir que:

-se o objetivo das simulações é determinar somente a quantidade de calor volumétrico armazenado no solo, o mais conveniente é resolver somente a equação de energia, pois a resolução acoplada da temperatura com a umidade, além de não influenciar significativamente no resultado, aumenta em mais de três vezes o tempo de simulação;

-se o objetivo das simulações, além de determinar a quantidade de calor volumétrico armazenado no solo é também verificar o campo de umidade, o modelo será simulado empregando a resolução acoplada da temperatura com a umidade.

O estudo dos próximos cinco casos objetiva verificar se amplitudes da temperatura do meio ambiente maiores que 14 °C podem chegar a produzir alguma variação percentual significativa entre o calor volumétrico armazenado no solo obtido empregando a resolução acoplada da energia e da umidade e a resolução da equação da temperatura. Para isso, são utilizadas senóides com amplitudes de: 14, 20, 30, 40 e 50 °C. Tanto os valores dos parâmetros (diâmetro do duto, conteúdo de umidade e velocidade do fluxo de ar) como o número de volumes de controle e o passo temporal são iguais àqueles utilizados nas simulações que originaram a Tabela 5.1. Em todas as simulações destes cinco casos são empregados distância entre centros de 0,20 metro e comprimento do duto de 5 metros.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados de 10 simulações realizadas nos cinco casos analisados. A primeira coluna desta tabela mostra as amplitudes das senóides empregadas para reproduzir a temperatura do ar na entrada do duto e o tipo de resolução das equações governantes (resolução acoplada ou de somente a temperatura). A segunda coluna da Tabela 5.2 permite observar a variação dos números de ciclos necessários para que o modelo de um duto isolado torne-se periódico, considerando os dois tipos de resolução avaliados. Nesta coluna, verifica-se que à medida que a amplitude de senóide aumenta a quantidade de ciclos utilizados para alcançar a periodicidade na resolução acoplada aumenta fortemente, enquanto que na outra resolução o número de ciclos permanece igual a cinco. Este forte acréscimo no número de ciclos para atingir a periodicidade na resolução acoplada, deve-se provavelmente à amplitude da oscilação que o conteúdo de umidade sofre nas proximidades do duto, quando este último for submetido a uma maior variação da temperatura. Nesta situação, observa-se que quanto maior for a amplitude da oscilação do conteúdo de umidade maior será o número de ciclos necessários para alcançar a

periodicidade. Para a situação onde é resolvida somente a equação da energia a amplitude da oscilação do conteúdo de umidade é menor, logo o número de ciclos necessários para atingir a periodicidade do modelo de um duto isolado permanece constante.

Tabela 5.2 – Comparação entre os calores volumétricos armazenados no solo para diferentes senóides usando a resolução acoplada do calor e umidade e de somente a equação da temperatura

Amplitude da senóide, que é usada como temp. de entrada		Ciclos até periódico	Tempo de simul. até períód. (h)	Tempo de simul. p/o calc. d/calor (min)	Calor por volume (MJ/m ³)	Variação percentual
14 °C	Acoplada	5	5,3573	64,5543	16,451797	0,00022%
	Só temp.	5	1,5215	18,3464	16,451833	
20 °C	Acoplada	17	25,3178	89,3569	23,503206	0,00041%
	Só temp.	5	1,5982	19,1784	23,503302	
30 °C	Acoplada	60	84,4980	84,4879	35,257563	0,00084%
	Só temp.	5	1,6644	19,9728	35,257860	
40 °C	Acoplada	93	132,1623	85,2661	47,015662	0,00146%
	Só temp.	5	1,7142	20,5704	47,016348	
50 °C	Acoplada	117	167,9418	86,1241	58,778913	0,00226%
	Só temp.	5	1,7535	21,0421	58,780241	

As colunas três e quatro da Tabela 5.2 mostram, respectivamente, o tempo de simulação necessário para que o modelo torne-se periódico e o tempo de simulação empregado no cálculo do calor. No que diz respeito ao tempo de simulação consumido até o modelo torne-se periódico, verifica-se que, para a situação acoplada, ele cresce proporcionalmente ao número de ciclos utilizados. Por outro lado, este tempo de simulação se mantém praticamente constante para a situação na qual é resolvida somente a equação da energia. A quinta coluna apresenta os calores armazenados no solo por unidade de volume para os dois tipos de resolução avaliada.

A sexta coluna da Tabela 5.2, apresenta a variação percentual entre os calores volumétricos armazenados nas duas resoluções analisadas. Nesta coluna, verifica-se que as diferenças percentuais entre os calores volumétricos armazenados nas duas resoluções não superam o valor de 0,00226%. Isto indica que, em um modelo de um duto isolado submetido a uma variação periódica de temperatura de até 50 °C, o valor da parcela correspondente ao calor transportado pela difusão da umidade é, ainda, significativamente menor que o valor de 0,1 % alegado pela bibliografia visto no início desta subseção.

A Figura 5.16 apresenta o calor volumétrico armazenado no solo pelos modelos de um duto isolado, de um duto com convecção e de dois dutos com convecção em função da amplitude da senóide empregada, sendo que o calor volumétrico armazenado pelo modelo de um duto isolado é o mesmo mostrado na quinta coluna da Tabela 5.2. Nesta figura, observa-se que os calores volumétricos armazenados no solo pelos três modelos computacionais investigados

aumentam de uma forma diretamente proporcional com o acréscimo da amplitude da senóide.

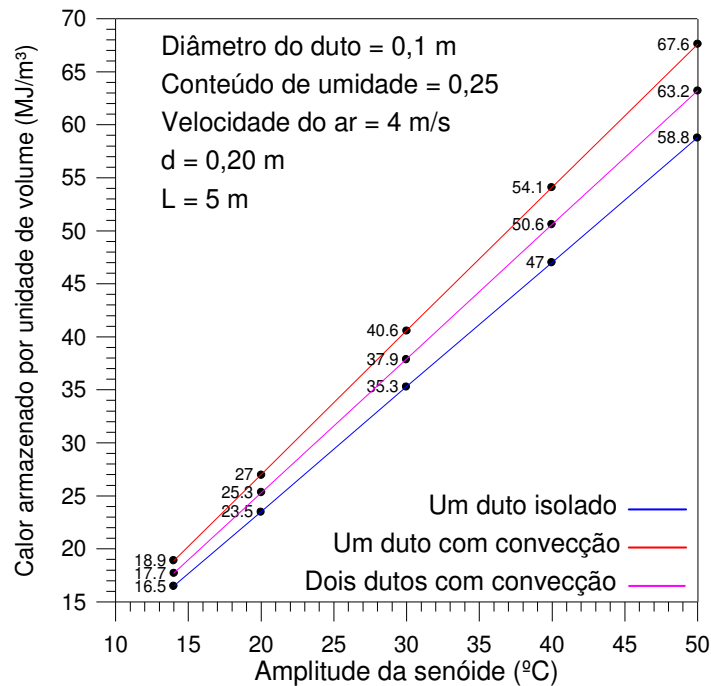


Figura 5.16 – Calores volumétricos armazenados em função da amplitude da senóide

Esta perfeita proporcionalidade entre os calores volumétricos armazenados no solo e a amplitude da senóide, mostrada na Figura 5.16, permite determinar as equações das retas que passam pelos pontos correspondentes a cada um dos três modelos computacionais analisados. Assim sendo, as equações destas retas servirão para fazer previsões da quantidade de calor volumétrico armazenado no solo pelos três modelos anteriores considerando senóides com amplitudes diferentes das utilizadas neste estudo.

5.3.2 Comparação entre os calores volumétricos armazenados pelos diferentes modelos

A comparação entre os calores volumétricos armazenados no solo pelos quatro modelos computacionais avaliados visa auxiliar na escolha do modelo a ser adotado em uma situação real. Para isso, em cada um dos nove casos apresentados na Tabela 5.3, são realizadas duas simulações considerando: a resolução acoplada da equação da energia e da umidade e a resolução da equação da temperatura. Os valores recomendados para os parâmetros, assim como o número de volumes de controle são os mesmos empregados nos casos da Tabela 5.1.

Na primeira coluna da Tabela 5.3 são apresentadas as combinações dos valores das distâncias entre centros com os comprimentos dos dutos empregados, assim como o tipo de

resolução das equações governantes utilizado (resolução acoplada ou só da temperatura). A segunda, terceira e quarta coluna mostram, respectivamente, o calor volumétrico armazenado no solo para os modelos de um duto isolado, de dois dutos isolados e de um duto com convecção. A quinta coluna mostra a diferença percentual entre os valores da segunda e da quarta coluna, ou seja, a variação percentual entre os valores dos calores volumétricos armazenados para o modelo de um duto com convecção e aqueles armazenados para o modelo de um duto isolado. As colunas sexta e sétima exibem, respectivamente, os valores dos calores volumétricos armazenados no solo para o modelo de dois dutos com convecção e a diferença percentual entre estes valores e os correspondentes ao modelo de um duto isolado.

Tabela 5.3 – Comparação entre os calores volumétricos armazenados no solo para os diferentes modelos usando a resolução acoplada e de somente a equação da temperatura

Distância entre centros (d) e comprimento do duto (L)	Calor volumétrico armazenado no solo pelos modelos (MJ/m^3)						
	Um duto isolado	Dois dutos isolados	Um duto com convecção	Variaç. persen. (%)	Dois dutos com convecção	Variaç. persen. (%)	
$d = 0,20 \text{ m}$							
$L = 5 \text{ m}$	Acoplada	16,451797	16,451800	18,931128	15,07	17,700000	7,59
	Só Temp.	16,451833	16,451835	18,931006	15,07	17,699894	7,59
$L = 10 \text{ m}$	Acoplada	14,182152	14,182154	17,179962	21,14	15,697041	10,68
	Só Temp.	14,182183	14,182186	17,179814	21,14	15,696896	10,68
$L = 20 \text{ m}$	Acoplada	10,806268	10,806271	14,468131	33,89	12,676170	17,30
	Só Temp.	10,806292	10,806296	14,467942	33,88	12,675960	17,30
$d = 0,25 \text{ m}$							
$L = 5 \text{ m}$	Acoplada	10,565648	10,565649	13,514160	27,91	12,043189	13,98
	Só Temp.	10,565674	10,565675	13,513962	27,90	12,043064	13,98
$L = 10 \text{ m}$	Acoplada	8,661120	8,661121	11,885645	37,23	10,282585	18,72
	Só Temp.	8,661140	8,661141	11,885427	37,23	10,282438	18,72
$L = 20 \text{ m}$	Acoplada	6,100907	6,100908	9,643541	58,07	7,908087	29,62
	Só Temp.	6,100920	6,100921	9,643300	58,06	7,907913	29,62
$d = 0,30 \text{ m}$							
$L = 5 \text{ m}$	Acoplada	7,154170	7,154171	9,943528	38,99	8,546511	19,46
	Só Temp.	7,154174	7,154174	9,943295	38,99	8,546386	19,46
$L = 10 \text{ m}$	Acoplada	5,772209	5,772209	8,693296	50,61	7,230734	25,27
	Só Temp.	5,772211	5,772211	8,693053	50,60	7,230602	25,27
$L = 20 \text{ m}$	Acoplada	3,972770	3,972771	7,065982	77,86	5,524679	39,06
	Só Temp.	3,972772	3,972772	7,065730	77,85	5,524539	39,06

Comparando os valores da terceira coluna com os da segunda coluna da Tabela 5.3, observa-se que não há diferença significativa entre eles. Isto indica que, em termos de calor volumétrico armazenado no solo os modelos de um e de dois dutos isolados são equivalentes.

As variações percentuais apresentadas na quinta coluna da Tabela 5.3, apontam uma

diferença significativa entre os valores dos calores volumétricos armazenados pelos modelos de um duto isolado e de um duto com convecção, sendo que as menores variações percentuais ocorrem para os menores valores de distâncias entre centros e de comprimentos. Nesta tabela, a menor variação de 15,07 % corresponde a uma distância entre centros de 0,20 m e um comprimento de 5 metros. Por sua vez, a maior variação percentual, de 77,86 %, acontece para a situação onde é utilizada uma distância entre centros de 0,30 m e um comprimento de 20 metros. O acentuado aumento do calor volumétrico armazenado no solo provocado tanto pelo acréscimo da distância entre centros como pelo aumento do comprimento, ocorre devido ao incremento da área de troca térmica com o meio ambiente. Vale lembrar que, um aumento da distância entre centros, d , significa um acréscimo do lado da face externa do solo do domínio computacional mostrado na Figura 3.9. Este acréscimo da área, que realiza troca convectiva com o meio ambiente, permite ao fluxo de calor associado a exercer uma predominância sobre aquele correspondente ao escoamento interno, que se mantém constante para um d maior ou diminui logaritmicamente para um maior comprimento do duto.

Por outro lado, observando as variações percentuais do calor volumétrico armazenado, apresentadas na última coluna da Tabela 5.3, verifica-se que o modelo de dois dutos com convecção produz resultados percentuais correspondentes, praticamente, à metade daqueles obtidos para o modelo de um duto com convecção. Isto pode ser explicado pelo fato de que o ganho de calor produzido pela troca térmica com o meio ambiente é dividido pelo volume de dois dutos.

Finalmente, a Tabela 5.3 indica que não existe diferença significativa entre os valores de calor volumétrico armazenado no solo empregando a resolução acoplada das equações de energia e de massa e a resolução de somente a equação da temperatura. Mesmo para os modelos de um e de dois dutos com convecção a diferença percentual é desprezível, sendo que nos casos analisados a maior destas diferenças é de $-0,0036$ %. Esta diferença é obtida para o modelo de um duto com convecção no caso de empregar uma distância entre centros de 0,30 m e um comprimento do duto de 20 metros.

5.4 Evoluções da temperatura e do conteúdo de umidade nos modelos analisados

Nesta seção são apresentadas e analisadas as evoluções da temperatura e do conteúdo de umidade nos modelos de um duto isolado, de um duto com convecção e de dois dutos com convecção em função do tempo. Para os dois primeiros modelos, também, são apresentadas as variações da temperatura em função da distância axial z .

5.4.1 Evoluções da temperatura e do conteúdo de umidade nos modelos de um duto isolado e de um duto com convecção

Nesta análise, são apresentadas as variações temporais da temperatura e da umidade para algumas situações significativas dos modelos de um duto isolado e de um duto com convecção, sendo estas variações exploradas através de dois tipos de gráficos. O primeiro tipo mostra as variações temporais de temperatura e de conteúdo de umidade nos volumes de controle representados pelos pontos P_1 , P_2 , P_3 e P_{ar} , conforme mostra o detalhe da Figura 5.17. Todos estes pontos se situam sobre o eixo de simetria vertical dos três cortes transversais xy realizados no duto, sendo estes cortes efetuados na entrada, na metade e na saída do duto. Assim, o ponto P_1 representa o primeiro volume de controle de solo pertencente ao eixo de simetria e o ponto P_3 reproduz o último. Por sua vez, o ponto P_2 , encontra-se na posição intermediária entre os dois pontos precedentes. O ponto P_{ar} ocupa uma posição adjacente ao ponto P_1 e representa a temperatura do ar do escoamento no interior do duto. O segundo tipo de gráfico apresenta a variação de temperatura que uma partícula de ar sofre ao se deslocar ao longo do duto em diferentes horários.

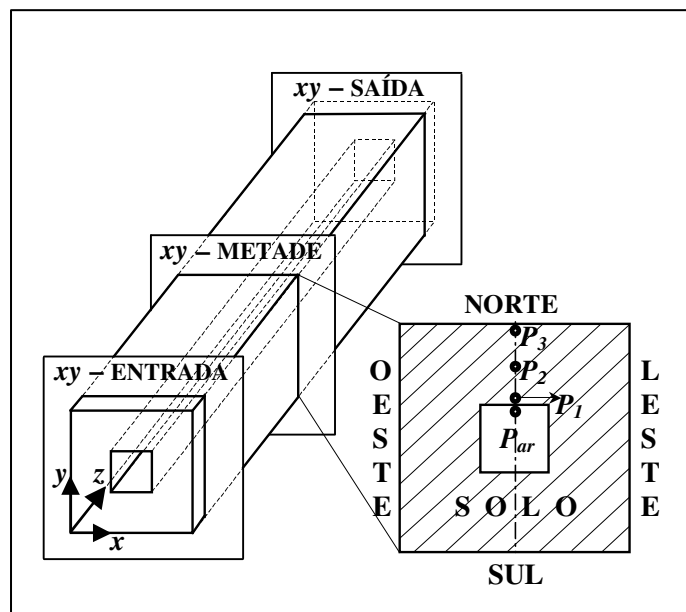


Figura 5.17 – Localização dos pontos P_1 , P_2 e P_3 nos cortes transversais xy do duto

A seguir, são analisadas algumas situações, que apresentaram as maiores variações nos campos de temperatura e, conseqüentemente, de conteúdo de umidade. Neste sentido, é necessário escolher situações que contenham os valores recomendados para os parâmetros, definidos na seção 5.1 deste capítulo. Assim, a primeira situação a ser analisada corresponde ao modelo de um duto isolado com os seguintes valores recomendados para os parâmetros:

diâmetro de 0,1 m; conteúdo de umidade de 0,25; velocidade do escoamento de 4 m/s; distância entre centros de 0,20 m e comprimento do duto de 5 m, sendo que este pequeno comprimento foi escolhido por apresentar a maior variação da temperatura nos pontos do corte transversal xy analisado, visto que variações da temperatura do escoamento sofre amortecimento logarítmico ao longo do duto. Além disso, esta primeira situação utiliza a senóide com amplitude de 14 °C, apresentada pela Figura 4.1, para fornecer a evolução da temperatura do ar na entrada do duto.

As Figuras 5.18 e 5.19, que resultam da primeira situação descrita no parágrafo precedente, apresentam, respectivamente, as variações temporais da temperatura e de conteúdo de umidade nos pontos mostrados pela Figura 5.17, sendo nesta situação o corte transversal xy realizado na metade do comprimento do modelo de um duto isolado. Na Figura 5.18, observa-se que a amplitude da curva de variação da temperatura no ponto P_{ar} tem um valor próximo de 12,00 °C. Ainda, verifica-se que esta curva, além de apresentar uma amplitude um pouco inferior a da senóide (que nesta figura é denominada de temperatura ambiente), ela possui uma certa defasagem em relação a esta última. Por outro lado, as amplitudes das curvas de variação da temperatura nos pontos P_1 , P_2 e P_3 são aproximadamente iguais a 8,23 °C, sendo que a curva correspondente ao ponto P_1 é a que se encontra menos defasada em relação à curva de variação da temperatura do escoamento de ar dentro do duto. Isto ocorre porque P_1 é o primeiro ponto a receber o fluxo de calor com maior intensidade na posição do corte transversal, que nesta situação é aquele associado à troca térmica entre o solo e o escoamento. Conseqüentemente, as próximas curvas com maior defasagem em relação à curva de variação da temperatura do escoamento são, em ordem crescente, as correspondentes aos pontos P_2 e P_3 , respectivamente, as quais demoram mais tempo para receber o fluxo térmico associado ao escoamento.

Na Figura 5.19, verifica-se que as curvas de variação do conteúdo de umidade dos pontos P_1 a P_3 , encontram-se em oposição de fase com as correspondentes da figura precedente. Isto ocorre devido ao comportamento inverso que a variação do conteúdo de umidade possui em relação à da temperatura; os pontos com temperatura relativa baixa possuem conteúdos de umidade maiores que os dos pontos com temperatura relativa alta e vice versa. A razão disto, responde ao mecanismo de transporte de umidade em meios porosos, que sucintamente é descrito a seguir. A umidade na forma de vapor migra sempre da região quente para a região fria, na qual se condensa, aumentando, assim, o conteúdo de umidade desta última região. Como a região quente é formada por pontos com temperaturas relativas altas, estes pontos possuem conteúdos de umidade menores que os dos pontos com temperatura relativa baixa, que compõem a região fria. A curva correspondente ao ponto P_1 , contém a maior amplitude de variação do conteúdo de umidade, que é de apenas 0,000289, o que obriga a realizar uma boa redução na escala do eixo das ordenadas da figura. As amplitudes das curvas correspondentes aos outros

dois pontos diminuem logarithmicamente à medida que estes pontos se afastam do primeiro.

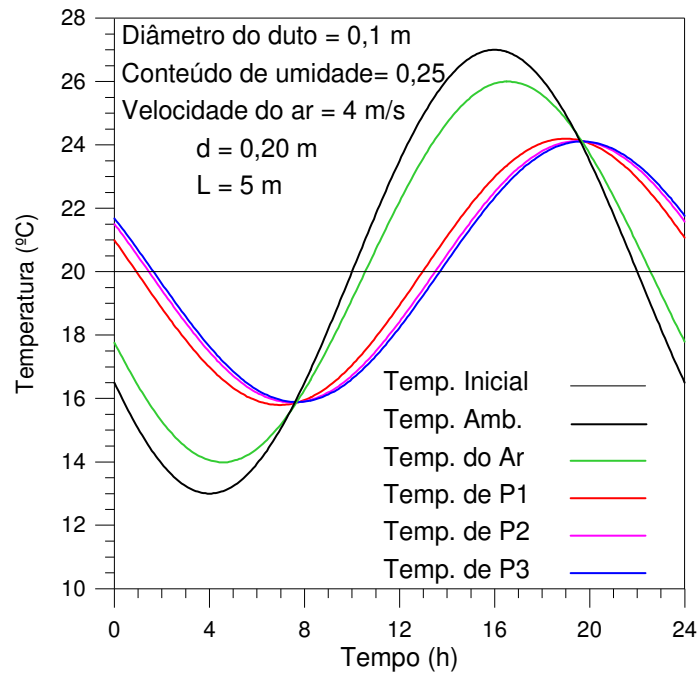


Figura 5.18 – Variação temporal da temperatura nos pontos do corte transversal xy na metade do comprimento do modelo de um duto isolado

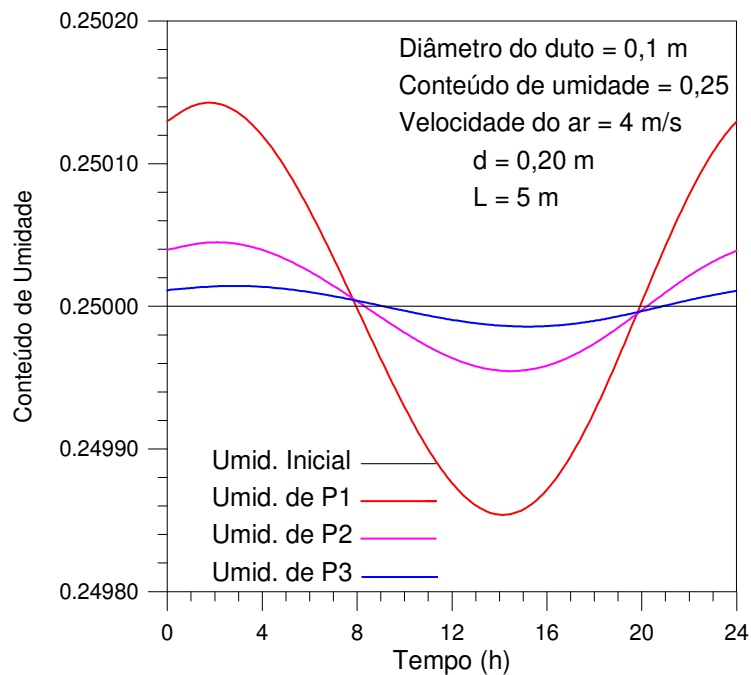


Figura 5.19 – Variação temporal da umidade nos pontos do corte transversal xy na metade do comprimento do modelo de um duto isolado

As Figuras 5.20 e 5.21 mostram, respectivamente, as evoluções temporais da temperatura e do conteúdo de umidade nos mesmos pontos da Figura 5.17, mas considerando um corte transversal xy realizado na metade do comprimento do modelo de um duto com convecção, conforme apresentado pela Figura 3.9. Na Figura 5.20, verifica-se que a amplitude da curva

correspondente ao ponto P_{ar} vale $12,36\text{ }^{\circ}\text{C}$ e as das curvas correspondentes aos pontos P_1 a P_3 são aproximadamente iguais a $10,00\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estes valores são superiores aos do modelo mostrado pela Figura 5.18 devido ao aumento do gradiente de temperatura produzido pela troca convectiva na face norte do presente modelo. Além disso, nesta figura se observa que as defasagens das curvas de variação da temperatura nos pontos P_1 , P_2 e P_3 é muito pequena, sendo que a ordem destas defasagens é diferente daquela apresentada pelo modelo referido anteriormente. Nesta situação, a curva de variação da temperatura correspondente ao ponto P_1 continua sofrendo a menor defasagem em relação às curvas de variação da temperatura do meio ambiente e do fluxo de ar. Isto ocorre porque este ponto recebe primeiro o fluxo térmico associado ao escoamento, o qual é mais intenso nessa posição se comparado com aquele produzido pela troca térmica entre o solo e o ar do meio ambiente. Já as curvas de variação da temperatura dos pontos P_2 e P_3 ocupam uma posição mais defasada que a correspondente ao ponto P_1 .

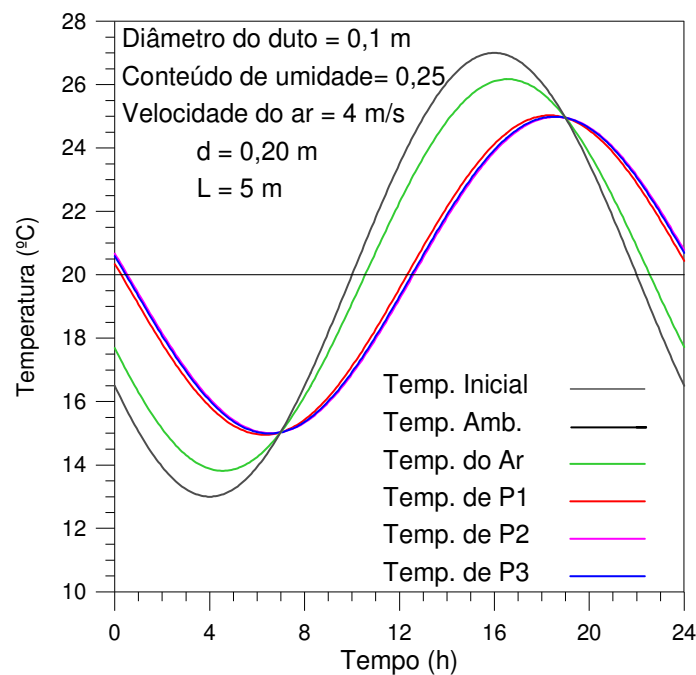


Figura 5.20 – Variação temporal da temperatura nos pontos do corte transversal xy na metade do comprimento do modelo de um duto com convecção

Na Figura 5.21, observa-se que as curvas de variação do conteúdo de umidade dos pontos P_1 a P_3 , além de estar em oposição de fase com as correspondentes curvas de evolução da temperatura nestes pontos, elas se encontram defasadas na mesma ordem que as curvas de variação da temperatura. Isto acontece devido ao comportamento inverso que a variação do conteúdo de umidade possui em relação a da temperatura, como foi discutido na análise da Figura 5.19. Nesta situação, a curva correspondente ao ponto P_1 contém a maior amplitude de variação do conteúdo de umidade, que é de $0,000366$. Este valor representa $26,64\%$ maior que

aquele obtido para a amplitude de variação do conteúdo do modelo de um duto isolado. Isto ocorre porque, neste modelo, os pontos avaliados recebem gradientes de temperaturas maiores devidos à ação conjunta dos fluxos de calor associados ao escoamento e ao meio ambiente.

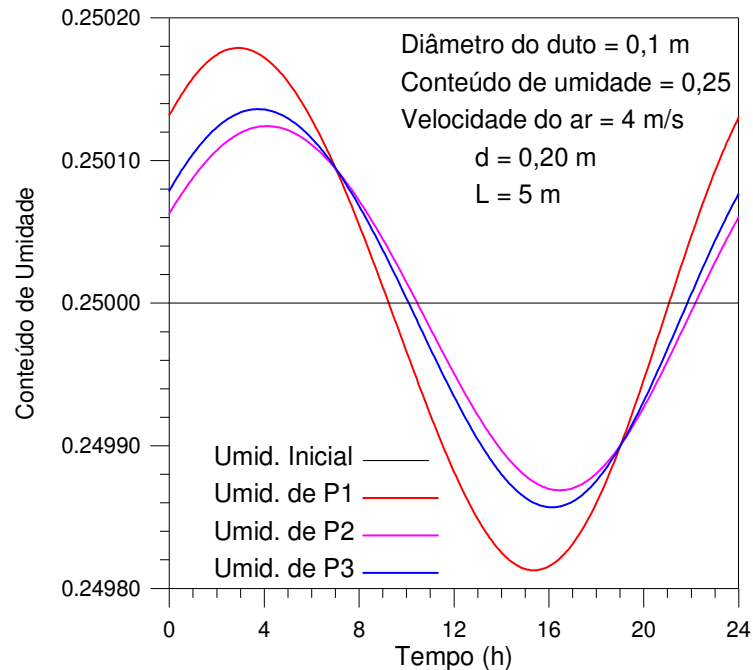


Figura 5.21 – Variação temporal da umidade nos pontos do corte transversal xy na metade do comprimento do modelo de um duto com convecção

Uma observação conjunta das Figuras 5.20 e 5.21 permite concluir que uma variação da temperatura de até 10,00 °C aplicada em um volume de controle de solo produz uma variação do conteúdo de umidade de apenas 0,000366 nesse volume; conseqüentemente, pode-se afirmar que, para uma variação periódica da temperatura do meio ambiente de até 14 °C, não ocorre desenvolvimento de frentes de secagens significativas no solo do corte transversal avaliado.

A próxima situação a ser analisada objetiva verificar se variações na temperatura do meio ambiente maiores que 14 °C podem chegar a produzir alguma frente de secagem significativa nas proximidades do duto. Neste sentido, foi escolhido o modelo de um duto com convecção, porque ele apresentou as maiores variações nos perfis de temperatura e, conseqüentemente, de conteúdo de umidade. Assim, a senóide utilizada no modelo precedente foi substituída por outra com uma amplitude de 50 °C. Os resultados das simulações com a nova senóide são mostrados pelas Figuras 5.22 e 5.23, as quais apresentam, respectivamente, as variações temporais da temperatura e do conteúdo de umidade nos mesmos pontos P_1 , P_2 e P_3 definidos pela Figura 5.17.

Na Figura 5.22, observa-se que a amplitude da curva de variação da temperatura do escoamento no ponto P_{ar} vale 44,15 °C. Por sua vez, as amplitudes das curvas de variação da

temperatura dos pontos P_1 , P_2 e P_3 são aproximadamente iguais a $36,00\text{ }^\circ\text{C}$. Comparando estes resultados com aqueles obtidos para a situação precedente, modelo de um duto com convecção utilizando uma senóide com amplitude de $14\text{ }^\circ\text{C}$, verifica-se que um aumento de $257,14\%$ na amplitude da senóide, a qual fornece as temperaturas na entrada do duto e do meio ambiente, resulta num crescimento de $259,90\%$ na amplitude das curvas de variação da temperatura dos pontos P_1 , P_2 e P_3 .

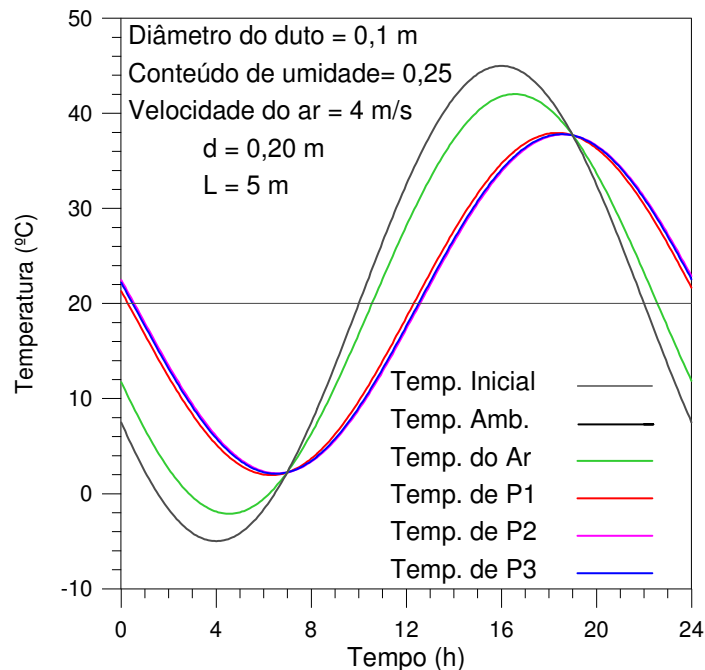


Figura 5.22 – Variação temporal da temperatura nos pontos do corte transversal xy no modelo de um duto com convecção e utilizando uma senóide com amplitude de $50\text{ }^\circ\text{C}$

Na Figura 5.23, nota-se que as curvas de variação do conteúdo de umidade dos pontos P_1 a P_3 , também estão em oposição de fase com as correspondentes curvas de variação da temperatura destes pontos, sendo que elas se encontram defasadas na mesma ordem que as curvas de variação da temperatura. Assim, a curva correspondente ao ponto P_3 contém a maior amplitude de variação do conteúdo de umidade, que é de $0,001348$. Este valor representa $268,31\%$ maior que aquele obtido para a amplitude de variação do conteúdo do modelo de um duto com convecção e utilizando uma senóide com amplitude de $14\text{ }^\circ\text{C}$. Em outras palavras, uma variação da temperatura de até $36,00\text{ }^\circ\text{C}$ num ponto qualquer do solo, produz uma variação do conteúdo de umidade de $0,001348$ nesse ponto, a qual representa somente $0,54\%$ do conteúdo de umidade inicial. Isto indica que, mesmo considerando uma situação extrema (utilizando uma amplitude de $50\text{ }^\circ\text{C}$ para a senóide que fornece as temperaturas do ar na entrada do duto e do meio ambiente), não ocorrerá desenvolvimento de frentes de secagens nos pontos do solo situados no corte transversal analisado. Com isto, pode-se concluir que, em processos de transferência de calor (carga e descarga do solo) por períodos de 24 horas e considerando as

situações mais extremas possíveis, ou seja, com variações de temperatura ambiente de até 50 °C, a migração da umidade não será suficiente para produzir uma frente de secagem no solo do corte transversal investigado.

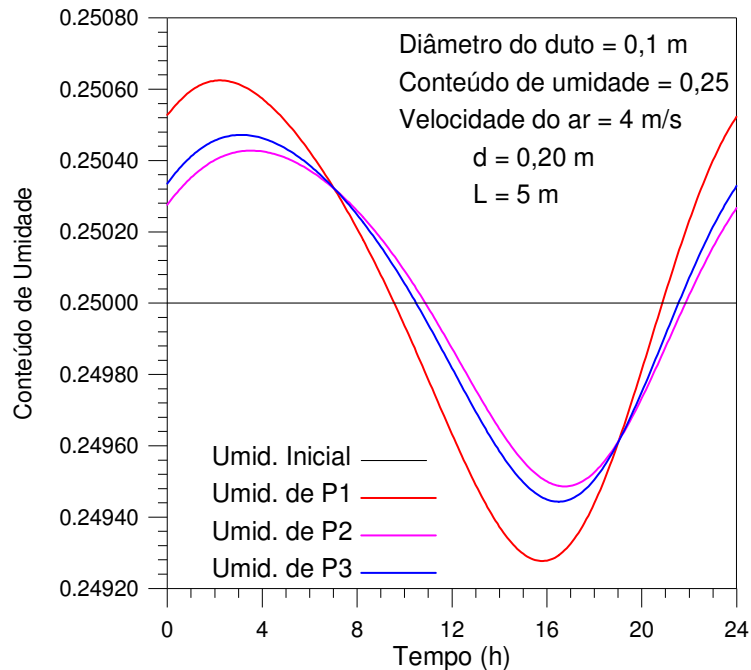


Figura 5.23 – Variação temporal da umidade nos pontos do corte transversal xy no modelo de um duto com convecção e utilizando uma senóide com amplitude de 50 °C

A situação seguinte a ser explorada, apresentada pelas Figuras 5.24 e 5.25, objetiva mostrar as evoluções temporais da temperatura e do conteúdo de umidade do ponto P_1 , mas considerando as três posições dadas pelos cortes transversais xy definidos pela Figura 5.17. Isto significa que, neste caso, tanto a variação da temperatura como da umidade serão avaliadas em três pontos ao longo da superfície do duto, os quais correspondem ao mesmo ponto P_1 para cortes na entrada, na metade e na saída do tubo do modelo de um duto isolado. Visando explorar a queda logarítmica da temperatura do escoamento ao longo de duto e, conseqüentemente, verificar sua influência nas variações temporais da temperatura e do conteúdo de umidade nos três pontos da superfície do duto, será empregado o maior comprimento recomendado determinado na subseção 5.1.3 deste capítulo, que é de 20 metros.

Na Figura 5.24, observa-se que, à medida que o ponto se distancia da entrada do duto, as curvas de variação da temperatura associadas, além de sofrer amortecimento na sua amplitude, apresentam maior defasagem em relação à senoide que simula a temperatura do meio ambiente. Para esta situação, as amplitudes das curvas correspondes aos pontos situados na entrada, na metade e na saída do duto são iguais a 9,47, 5,66 e 2,78 °C, respectivamente. A maior amplitude e menor defasagem da curva de variação da temperatura do ponto situado na entrada

do duto é decorrente do fato que este ponto é o primeiro a receber o fluxo de calor associado ao escoamento; a amplitude e a defasagem intermediárias da curva do ponto localizado na metade do duto é consequência da troca térmica que o escoamento realiza com a superfície do duto e do tempo gasto até chegar ao segundo ponto. Em outras palavras, são duas as razões que explicam o amortecimento da amplitude e a defasagem da curva de variação da temperatura do ponto situado na metade do duto. A primeira revela que o amortecimento da amplitude desta curva acontece devido à menor intensidade do fluxo de calor que atua nesse ponto, que é consequência da troca térmica que uma partícula de ar, que compõe o escoamento, realiza com a superfície do duto ao deslocar-se axialmente. A segunda razão indica que a defasagem da curva ocorre em resposta à demora da ação deste fluxo térmico associado ao escoamento, que é produzida pelo tempo que a partícula leva ao deslocar-se axialmente até alcançar a metade do duto. Por último, a menor amplitude e a maior defasagem da curva do ponto localizado na saída do duto também é consequência da troca térmica que o escoamento realiza com a superfície do duto e do tempo gasto até alcançar este terceiro ponto.

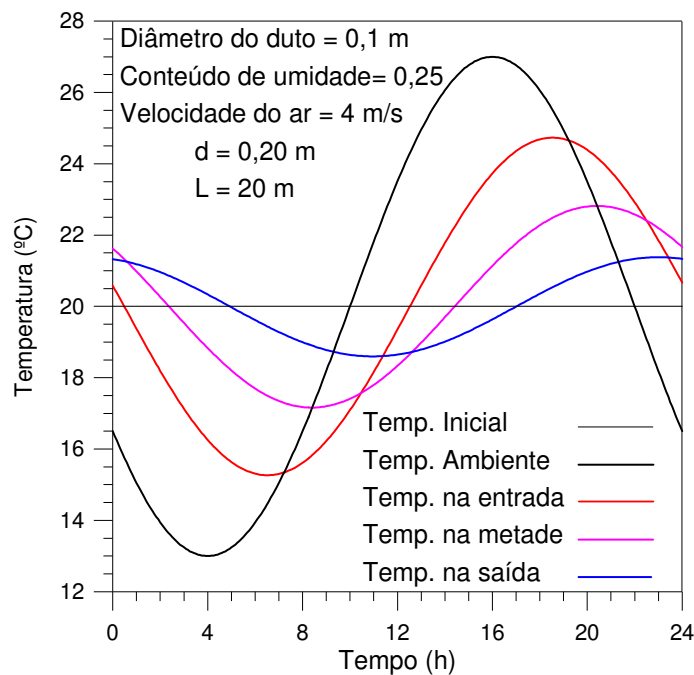


Figura 5.24 – Variações da temperatura do solo em pontos ao longo da superfície do duto

Na Figura 5.25, verifica-se que as curvas de variação do conteúdo de umidade dos pontos P_1 a P_3 , também estão em oposição de fase com as correspondentes curvas de variação da temperatura destes pontos, sendo que elas se encontram defasadas na mesma ordem que as curvas de variação da temperatura. Nesta situação, as amplitudes das curvas correspondentes aos pontos situados na entrada, na metade e na saída do duto são iguais a 0,000325, 0,000195 e 0,000096 °C, respectivamente.

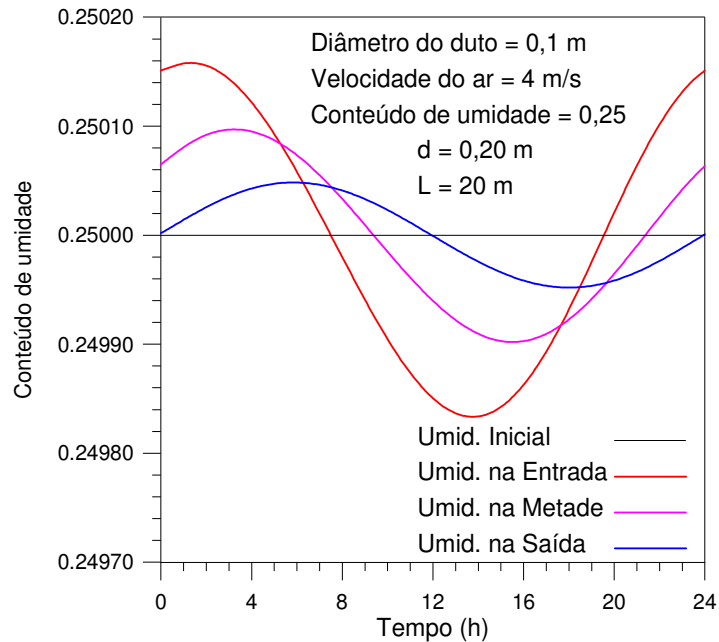


Figura 5.25 – Variações da umidade do solo em pontos ao longo da superfície do duto

As Figuras 5.18 a 5.25 apresentaram a evolução da temperatura e do conteúdo de umidade em função do tempo, ou seja, a verificação da variação temporal de temperatura e de conteúdo de umidade dos volumes de controle, representados pelos pontos P_1 , P_2 e P_3 . A seguir, será analisado o segundo tipo de gráfico empregado nesta subseção, que exibe a variação de temperatura que uma partícula sofre ao deslocar-se ao longo do duto em diferentes horários.

As Figuras 5.26 e 5.27 apresentam a evolução da temperatura do escoamento ao longo do duto para os modelos de um duto isolado e de um duto com convecção, respectivamente. Os valores recomendados para os parâmetros são os mesmos usados nas situações anteriores, exceto o comprimento do duto, que é de 20 metros. Este valor recomendado para o comprimento é adotado para possibilitar a verificação da queda (ou elevação) logarítmica da temperatura do escoamento ao longo do duto.

Na Figura 5.26, observa-se que as curvas de variação da temperatura correspondentes às 10, 12, 14 e 16 horas decrescem logaritmicamente, significando que o escoamento, nestes horários, fornece calor ao solo. A curva correspondente às 18 horas também é decrescente, sendo que ela decresce com concavidade negativa até aproximadamente a metade do duto e, posteriormente, continua decrescendo mas com concavidade positiva. Por outro lado, as curvas de variação da temperatura correspondentes às 22, 24, 2 e 4 horas crescem logaritmicamente, denotando que o escoamento, nestes horários, recebe calor do solo. A curva correspondente às 6 horas cresce com concavidade positiva até aproximadamente a metade do duto e, a partir dessa posição, continua decrescendo mas com concavidade negativa. As curvas de variação da temperatura correspondentes às 8 e 20 horas possuem um comportamento misto se comparado às

curvas pertencentes aos outros horários. A primeira destas curvas decresce até aproximadamente um quarto do comprimento do duto e, a partir desta posição, cresce até o final do duto. Em contraste, a segunda destas curvas tem um comportamento inverso ao da anterior, ou seja, ela cresce até aproximadamente um quarto do comprimento e, posteriormente, decresce até o final do duto. O comportamento diferente destas duas curvas indica que as temperaturas do escoamento e do solo são próximas, significando que, nestes horários, o escoamento fornece e recebe calor de partes diferentes do duto. Para as 8 horas do dia, o escoamento fornece calor ao solo até uma distância igual a um quarto do comprimento do duto e recebe calor do solo a partir dessa posição. Já para as 20 horas significa o inverso, ou seja, o escoamento recebe calor do solo até um quarto do comprimento e fornece calor ao solo a partir dessa posição.

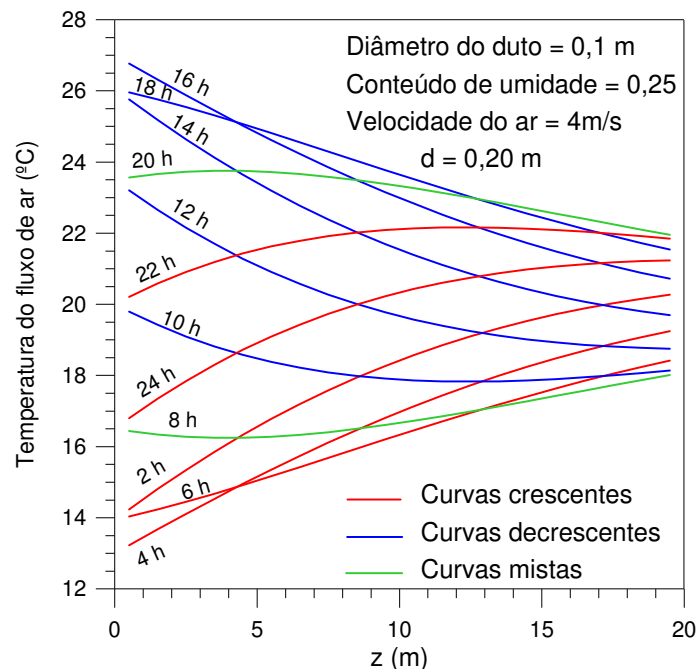


Figura 5.26 – Curvas de variação da temperatura do escoamento em função da distância axial z do modelo de um duto isolado

Na Figura 5.27, observa-se que as curvas de evolução da temperatura correspondentes aos horários analisados apresentam um comportamento semelhante às associadas ao modelo de um duto isolado, sendo o valor das curvas de variação da temperatura na saída do duto a única diferença entre eles. Em particular, observa-se que para esta figura os valores mínimos e máximos das curvas de evolução da temperatura são, respectivamente, aproximadamente iguais a 17 e 23 °C, sendo que para a Figura 5.26 estes valores valem em torno de 18 e 22 °C. Este aumento na diferença entre o maior e o menor valor das curvas de variação da temperatura na saída do duto, que nesta situação é de 6 °C, deve-se à condição convectiva deste modelo. Como nesta situação tanto a temperatura do escoamento como a do meio ambiente estão em fase, ambas fornecem ou retiram calor do solo, havendo um amortecimento da

queda (ou elevação) logarítmica da temperatura do escoamento ao longo do duto. Isto ocorre porque há um enfraquecimento da troca térmica que o escoamento realiza ao longo do duto devido à contribuição, em fase, da parcela de calor proveniente da condição convectiva da face norte do modelo.

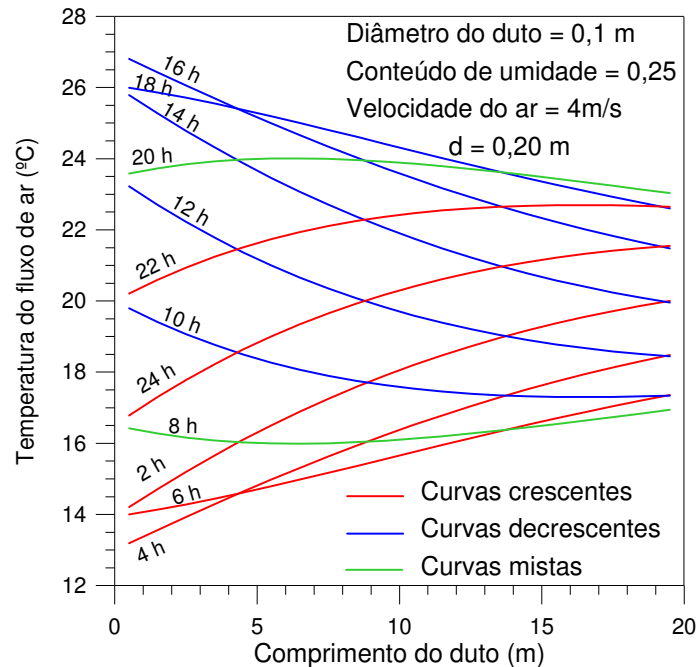


Figura 5.27 – Curvas de variação da temperatura do escoamento em função da distância axial z do modelo de um duto com convecção

As Figuras 5.26 e 5.27, que apresentaram as variações da temperatura do escoamento em função da distância axial z para os modelos de um duto isolado e de um duto com convecção, respectivamente, mostraram que as formas das curvas de variação da temperatura dependem se no horário em questão o escoamento fornece ou recebe calor do solo. Assim, nas horas do dia em que o escoamento fornece calor ao solo as correspondentes curvas decrescem logaritmicamente. Em contraste, quando o escoamento recebe calor do solo as curvas associadas a estes horários crescem logaritmicamente. Ainda, quando em um mesmo horário o escoamento fornece e recebe calor de partes diferentes do duto, a correspondente curva decresce para a primeira parte e cresce para a segunda parte do duto e vice-versa para a alternativa onde o escoamento recebe e fornece calor a partes distintas do duto num mesmo horário.

5.4.2 Evoluções da temperatura no modelo de dois dutos com convecção

A análise das evoluções da temperatura no modelo de dois dutos com convecção é semelhante à realizada para o modelo de um duto com convecção. Para facilitar esta análise, são

diferenciados os dutos que formam o modelo em questão, apresentado pela Figura 3.12. Assim, denomina-se de primeiro duto aquele que recebe na face norte uma troca convectiva com o meio ambiente e de segundo duto o que localiza-se abaixo do primeiro duto. Por sua vez, o ponto que representa a temperatura do escoamento no primeiro duto ocupa a mesma posição do P_{ar} da Figura 5.17 e o ponto que representa a temperatura do outro escoamento, encontra-se numa posição idêntica ao primeiro mas localizado no segundo duto. Já os pontos P_1 , P_2 e P_3 do modelo em questão encontram-se no primeiro duto e ocupam as mesmas posições de seus homônimos apresentados na Figura 5.17. Como nesta análise são examinadas situações que apresentam as maiores variações de temperatura nos pontos anteriormente definidos, são empregados os mesmos valores recomendados para os parâmetros determinados na seção 5.1 deste capítulo. Assim sendo, todas as situações examinadas nesta análise utilizam: um diâmetro de 0,1 m, um conteúdo de umidade de 0,25, uma velocidade do escoamento de 4 m/s e uma distância entre centros de 0,20 m. Para simular a temperatura do ar nas entradas dos dutos que compõem este modelo, utiliza-se a senóide com amplitude de 14 °C apresentada na Figura 4.1.

Na Figura 5.28, que apresenta a evolução da temperatura nos pontos de um corte transversal xy na metade do modelo de dois dutos com 5 metros de comprimento, observa-se que, a principal diferença em relação ao modelo de um duto com convecção, é a inclusão da curva de temperatura do escoamento correspondente ao segundo duto (Temp. do Ar2, da figura). Nesta figura, verifica-se que as amplitudes das curvas de temperatura dos escoamentos associados ao primeiro duto (Temp. do Ar1, da figura) e ao segundo duto são iguais a 12,33 e 12,04 °C, respectivamente. Esta maior amplitude da curva de temperatura do escoamento do primeiro duto, deve-se ao aumento do gradiente de temperatura no ponto avaliado, sendo que este acréscimo do gradiente deve-se à troca convectiva que a face norte deste duto realiza com o meio ambiente. Tanto a amplitude como as posições das curvas de temperatura correspondentes aos pontos P_1 a P_3 são idênticas àquelas apresentadas para o modelo de um duto com convecção.

As Figura 5.29 e 5.30 mostram, respectivamente, as evoluções da temperatura nos pontos dos cortes transversais xy na metade e na saída do modelo de dois dutos com 20 metros de comprimento. Na primeira destas figuras, observa-se que a amplitude da curva de temperatura do escoamento correspondente ao primeiro duto, é de 8,71 °C e, também, que a amplitude da curva associada ao segundo duto é de 7,73 °C. Se comparada com a situação precedente, apresentada na Figura 5.28, esta diferença relativa maior entre as amplitudes das curvas de temperatura, deve-se à maior distância existente entre as entradas dos dutos e o corte transversal xy , onde se localizam os pontos em que se avalia a temperatura. Esta maior distância entre o corte transversal e as entradas implica num rebaixamento logarítmico maior das temperaturas de ambos os escoamentos nos pontos do referido corte. Assim, partindo de temperaturas de

escoamentos nos pontos do corte transversal menores que as da situação precedente (mostrada na Figura 5.28), a ação de um fluxo de calor associado à troca convectiva idêntico ao encontrado na situação precedente, produz uma diferença maior entre as temperaturas dos escoamentos nestes pontos. Por outro lado, as amplitudes das curvas de temperatura correspondentes aos pontos P_1 a P_3 são aproximadamente iguais a $7,55\text{ }^\circ\text{C}$. Nesta situação, é a curva de variação da temperatura correspondente ao ponto P_3 que apresenta a menor defasagem em relação às curvas de evolução da temperatura dos escoamentos e do meio ambiente. Isto acontece porque este ponto recebe primeiro o fluxo de calor mais intenso, que provém da troca térmica realizada pelo solo com o meio ambiente. Já as curvas de variação da temperatura associadas aos pontos P_1 e P_2 encontram-se mais defasadas que a correspondente ao ponto P_3 .

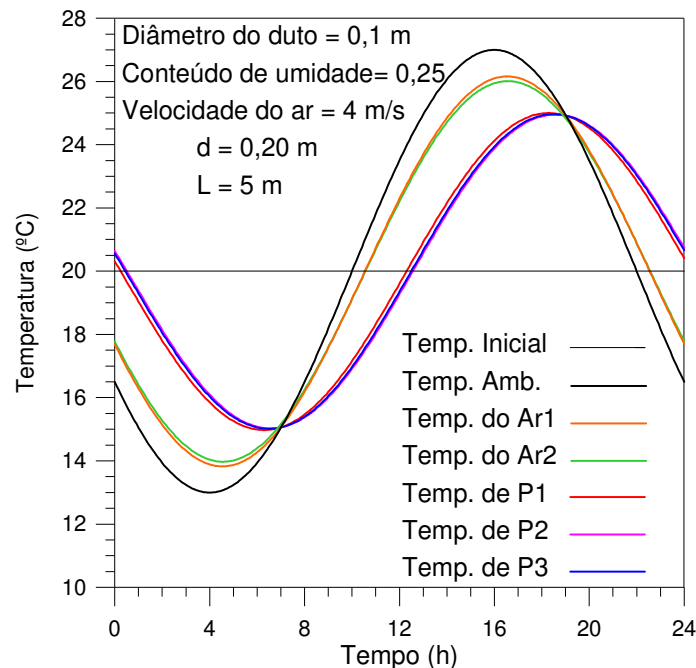


Figura 5.28 – Evolução da temperatura para um corte xy na metade do modelo de dois dutos com 5 metros de comprimento

Na Figura 5.30, verifica-se que as amplitudes das curvas de temperatura dos escoamentos correspondentes ao primeiro e segundo duto são iguais a $5,73$ e $4,37\text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. Se comparada com as duas situações precedentes, a diferença entre as amplitudes destas curvas é a maior de todas. Isto ocorre pela mesma razão discutida na situação precedente, ou seja, acontece porque nesta situação existe uma distância entre as entradas dos dutos e o corte transversal maior que a das situações anteriores. De outra parte, esta figura mostra que as amplitudes das curvas de temperatura correspondentes aos pontos P_1 a P_3 valem em torno de $5,28\text{ }^\circ\text{C}$. Nesta figura, também observa-se que, além da curva de variação da temperatura correspondente ao ponto P_3 continuar apresentando a menor defasagem em relação

às curvas de evolução da temperatura dos escoamentos e do meio ambiente, ela mostra uma defasagem maior em relação às curvas associadas aos pontos P_1 e P_2 . Esta defasagem maior das curvas correspondentes aos pontos P_1 e P_2 ocorre porque estes pontos demoram mais tempo em receber o fluxo de calor com maior intensidade, que no corte transversal avaliado corresponde àquele associado à troca convectiva com o meio ambiente.

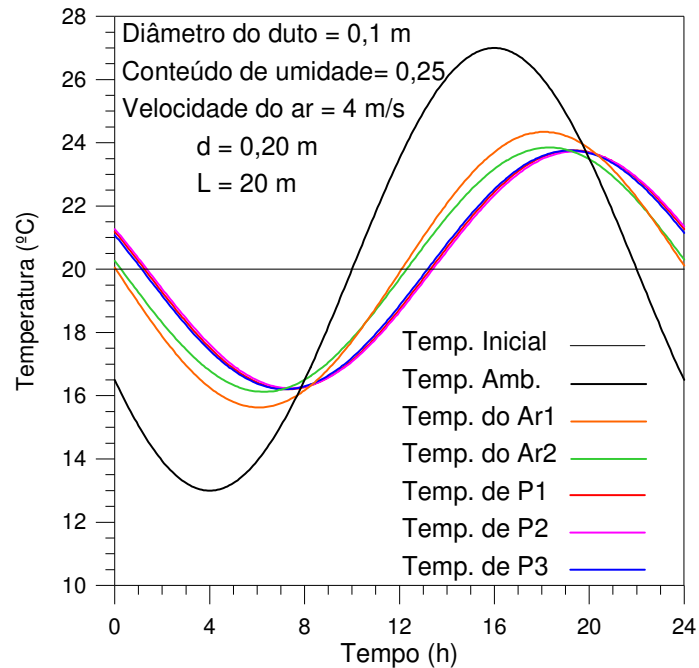


Figura 5.29 – Evolução da temperatura para um corte xy na metade do modelo de dois dutos com 20 metros de comprimento

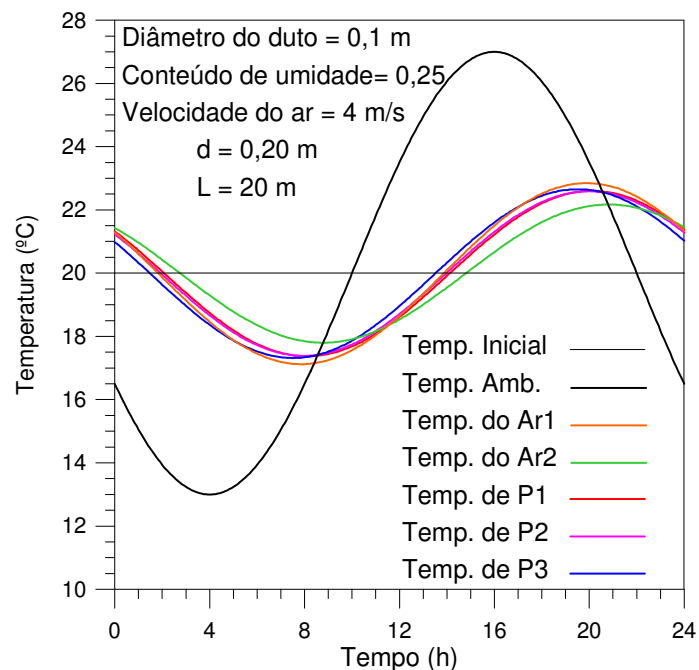


Figura 5.30 – Evolução da temperatura para um corte xy na saída do modelo de dois dutos com 20 metros de comprimento

Uma análise conjunta das Figuras 5.28 a 5.30 permite concluir que, quanto mais distante encontra-se o corte transversal xy das entradas de ar para um modelo de dois dutos com convecção, maior será a diferença entre as amplitudes das curvas de temperatura correspondentes aos escoamentos de primeiro e do segundo duto. Ainda, é a distância anterior que determina qual fluxo de calor (o correspondente ao escoamento interno ou o associado à troca convectiva com o meio ambiente) é mais intenso nos pontos do corte transversal xy .

5.5 Campos de temperatura e de umidade para algumas situações

Esta seção apresenta os campos de temperatura e de conteúdo de umidade em dois dos três cortes transversais xy mostrados na Figura 5.17, sendo selecionados cortes transversais efetuados na metade do comprimento dos quatro modelos computacionais investigados. Particularmente, para o modelo de dois dutos com convecção, também é apresentado um campo de temperatura em um corte transversal realizado na saída dos dutos. Os valores dos diferentes parâmetros utilizados nas simulações destes modelos, como diâmetro e comprimento do duto, distância entre centros, conteúdo de umidade inicial no solo e velocidade do fluxo de ar dentro do duto, são escolhidos de forma a maximizar as variações dos campos de temperatura e de conteúdo de umidade. Escolhidos os valores recomendados para cada um dos parâmetros, eles são empregados nos quatro modelos computacionais avaliados. Os valores adotados para estes parâmetros são: diâmetro do duto de 0,1 m, comprimento de 5 m, distância entre centros de 0,20 m, conteúdo de umidade inicial no solo de 0,25 e velocidade do fluxo de ar dentro do duto de 4 m/s. Além disso, para os casos dos modelos com uma condição convectiva foi escolhido um valor para o coeficiente de transferência de calor por convecção de $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, que representa um valor típico para convecção natural de gases sobre uma superfície horizontal.

É importante salientar que, em todos os campos de conteúdo de umidade analisados nos quatro modelos, o conteúdo de umidade dentro do duto foi plotado artificialmente como sendo igual ao conteúdo inicial, que é de 0,25. Isto visa minimizar a diferença máxima existente entre os diversos valores de conteúdo de umidade de todo o domínio, provocando, assim, uma redução na escala representativa desta variável, que, por sua vez, representa a ampliação das pequenas variações (nuances) reveladas no perfil de umidade.

Na seqüência, são apresentados os campos de temperatura e de umidade para algumas situações significativas. Esta apresentação é realizada separadamente para cada um dos quatro modelos analisados, sendo apresentados, primeiramente, todos os perfis de temperatura e, posteriormente, os campos de conteúdo de umidade.

5.5.1 Modelo de um duto isolado

Os campos de temperatura e de conteúdo de umidade são obtidos em um corte transversal na metade do comprimento do modelo de um duto isolado, mostrado pela Figura 3.7, adotando-se os parâmetros definidos preliminarmente, conforme foi explorado no início desta seção. A escolha dos diferentes horários, onde são analisados os correspondentes perfis de temperatura e de conteúdo de umidade, seguem dois critérios. O primeiro seleciona situações que apresentam as maiores diferenças entre as temperaturas do ar do escoamento interno e do solo envolvente. Neste sentido, os dois horários que atendem a este critério são os das 2 e das 13 horas, correspondentes, respectivamente, à situação na qual a temperatura do escoamento é menor que a do solo e à situação inversa. O segundo critério seleciona horários que revelem as nuances dos perfis de temperatura e de conteúdo de umidade decorrentes da inversão no sentido do fluxo de calor que existe entre o escoamento e o solo. Dentro deste critério são escolhidos horários que contenham as duas situações possíveis. A primeira corresponde àquela onde o fluxo de calor, que inicialmente ocorre do solo para escoamento (escoamento recebe calor do solo), troca de sentido. Em contraste, a segunda situação corresponde àquela onde o fluxo de calor, que acontece do escoamento para solo (escoamento fornece calor ao solo), inverte de sentido. Os horários das 7, 8 e 9 horas apresentam as nuances dos campos de temperatura e de umidade para a primeira destas situações e os horários das 19, 20 e 21 horas mostram as pequenas variações destes campos para a segunda situação.

As Figuras 5.31 a 5.37 apresentam os campos de temperatura para as 2, 7, 8, 9, 13, 19 e 20 horas, respectivamente. Nesta análise não é exposto o campo de temperatura correspondente às 21 horas por ser idêntico ao do horário das 20 horas. Os perfis de temperatura mostrados pelas Figuras 5.31, 5.32 e 5.37, apontam que o escoamento de ar recebe calor do solo envolvente. As curvas de nível das Figuras 5.31 e 5.32 revelam que as maiores temperaturas do solo se encontram nos cantos externos do domínio. Isto ocorre devido à condição de isolamento térmico de todas as fronteiras externas do solo e à forma quadrada da seção transversal do domínio avaliado. Esta forma particular permite que aconteça uma troca de calor mais intensa na parte central dos lados quando comparados aos cantos do domínio. Como, nestas situações, o fluxo de calor gerado pela troca térmica entre o solo e o escoamento retira calor mais intensamente da parte central das fronteiras internas e externas do solo, os cantos destas fronteiras reúnem as maiores temperaturas do domínio. Pela mesma razão, as menores temperaturas do solo se situam na parte central de suas fronteiras internas, como evidenciam as formas das curvas de nível das figuras anteriores. Por sua vez, a Figura 5.32 mostra que o campo de temperatura possui uma pequena diferença entre a temperatura do escoamento e a do solo,

indicando que o fluxo de calor associado ao escoamento interno de ar, neste horário, está prestes a trocar de sentido. Já a forma das isotermas, expostas pela da Figura 5.37, revela que a retirada de calor proveniente do escoamento ainda não atingiu as fronteiras externas do domínio, uma vez que todas estas fronteiras possuem a maior temperatura do solo. Este fato é explicado pela pequena diferença entre a temperatura do escoamento e a do solo que ocorre neste horário.

Os perfis de temperatura apresentados pelas Figuras 5.33 a 5.36, revelam que, nestes horários, o escoamento de ar fornece calor ao solo. Comparando o campo de temperatura mostrado pela Figura 5.33 com o correspondente às 7 horas, verifica-se que às 8 horas o fluxo térmico associado ao escoamento já trocou de sentido, visto que nesta hora do dia a temperatura do escoamento é maior que a do solo. Além disso, a forma das curvas de nível da Figura 5.33 mostra que esta é uma situação particular, pois a difusão do calor proveniente do escoamento ainda não chegou às fronteiras externas do domínio. As Figuras 5.34 a 5.36, por sua vez, indicam que para estes horários há gradiente térmico entre o escoamento e as fronteiras externas do domínio, porque verifica-se um aumento da temperatura na parte central destas fronteiras. Por fim, o perfil de temperatura mostrado pela Figura 5.36 aponta uma diferença muito pequena entre a temperatura do solo e a do escoamento, indicando que às 19 hora o fluxo térmico associado ao escoamento está prestes a inverter novamente de sentido.

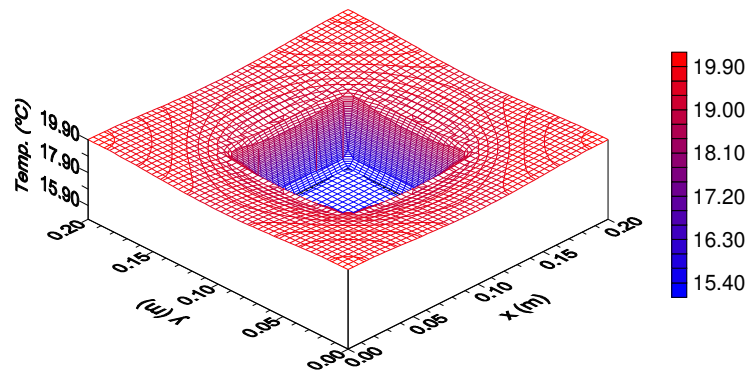


Figura 5.31 – Campo de temperatura às 2 horas para o modelo de um duto isolado

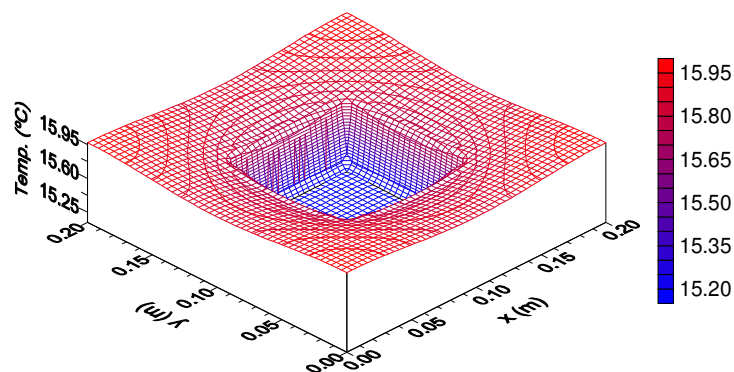


Figura 5.32 – Campo de temperatura às 7 horas para o modelo de um duto isolado

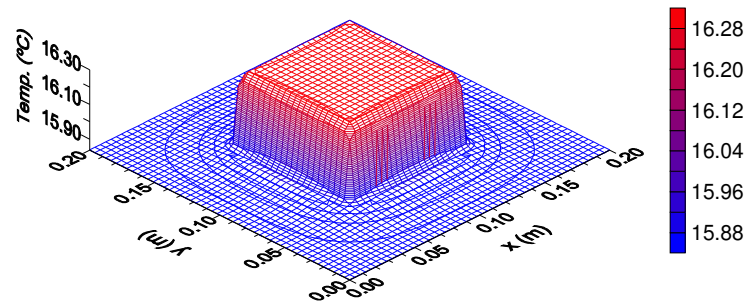


Figura 5.33 – Campo de temperatura às 8 horas para o modelo de um duto isolado

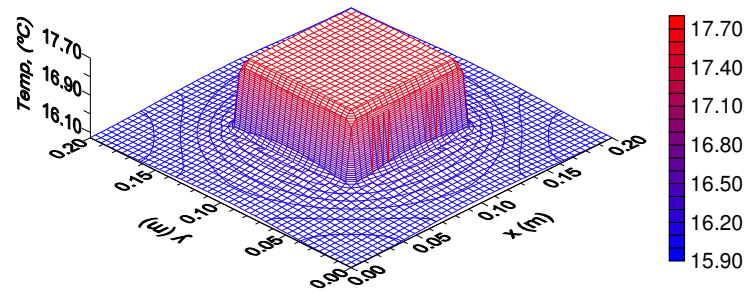


Figura 5.34 – Campo de temperatura às 9 horas para o modelo de um duto isolado

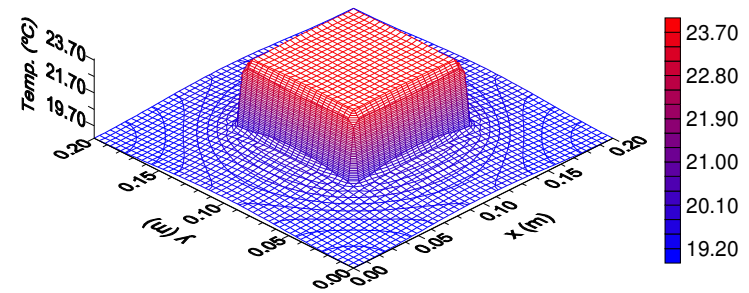


Figura 5.35 – Campo de temperatura às 13 horas para o modelo de um duto isolado

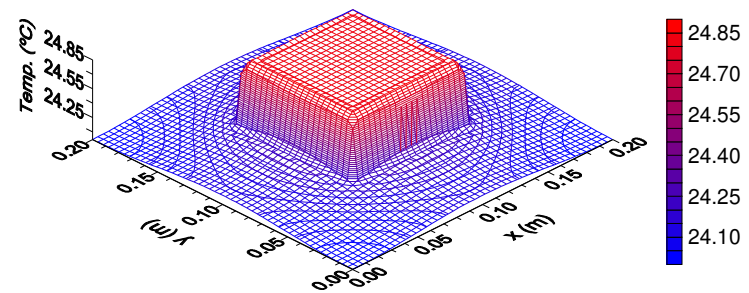


Figura 5.36 – Campo de temperatura às 19 horas para o modelo de um duto isolado

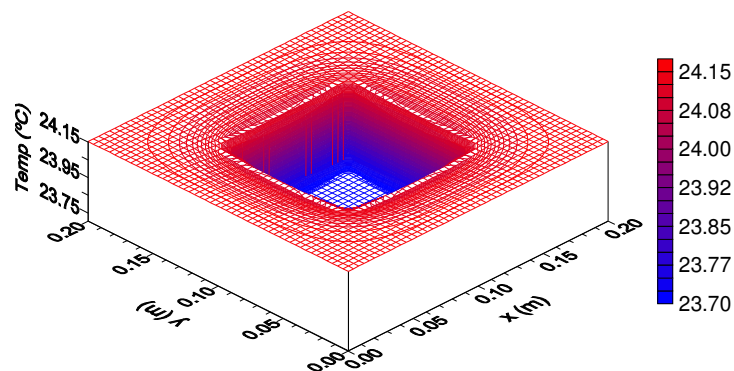


Figura 5.37 – Campo de temperatura às 20 horas para o modelo de um duto isolado

Os perfis de temperatura apresentados pelas Figuras 5.31 a 5.37 mostram que, durante o dia, o solo absorve calor do escoamento interno de ar e, durante a noite, o solo fornece calor para o fluxo de ar dentro do duto. Na seqüência, são apresentados os campos de umidade para os horários definidos pelos mesmos dois critérios usados na exposição dos perfis de temperatura.

As Figuras 5.38 a 5.45 apresentam os campos de conteúdo de umidade para as 2, 7, 8, 9, 13, 19, 20 e 21 horas, respectivamente. As curvas de nível das Figuras 5.38, 5.39, 5.44 e 5.45, mostram que há acúmulo de umidade na região próxima ao duto, onde os maiores valores de conteúdo de umidade se encontram na parte central das fronteiras internas do solo. Este acúmulo de umidade, como foi discutido na análise da variação temporal da umidade nos pontos da Figura 5.17, ocorre porque a umidade na forma de vapor migra da região quente (fronteiras externas do domínio) para a região fria (fronteiras internas do solo), onde se condensa, aumentando, assim, o conteúdo de umidade no entorno do duto, que neste caso supera o valor inicial. Desta forma, o campo de umidade possui comportamento inverso em relação ao campo de temperatura, ou seja, as regiões do solo com temperaturas relativas altas possuem conteúdos de umidade menores que os das regiões com temperaturas relativas baixas e vice versa. Em conseqüência, as intensificações dos acúmulos de umidade na parte central das fronteiras internas e externas do solo, reveladas pelas curvas de nível destas figuras, resultam das variações dos valores do perfil de temperatura, que apresenta uma redução mais acentuada nestas posições.

As curvas de nível das Figuras 5.38, 5.39 e 5.45 indicam que os menores conteúdos de umidade encontram-se nos cantos externos do domínio. Estes menores conteúdos de umidade respondem à compensação do aumento da umidade nas proximidades do duto e sua localização é determinada pelo comportamento inverso que o perfil de umidade possui em relação ao campo de temperatura. Vale lembrar, novamente, que como o sistema todo é impermeável ao fluxo de massa, a umidade apenas passa de uma região para outra sem, no entanto, sair do domínio. É

importante ressaltar o tamanho das escalas do eixo vertical destes campos de umidade, cujos valores variam muito pouco. Para o horário das 20 horas, os menores conteúdos de umidade situam-se na parte central das fronteiras externas do domínio. Isto ocorre porque, nesta situação, a intensidade do fluxo de umidade retira somente uma pequena quantidade de umidade da parte central das fronteiras externas do solo, onde sua ação é mais acentuada devido à forma quadrada do domínio, sendo que os cantos das fronteiras externas do solo conservam valores de conteúdo de umidade intermediários em relação à aqueles correspondentes ao horário das 19 horas.

Comparando o perfil de conteúdo de umidade apresentado pela Figura 5.45 e o correspondente às 20 horas, verifica-se que houve alteração na disposição dos menores conteúdos de umidade. Neste sentido, partindo do campo de conteúdo de umidade para as 20 horas, observa-se que, a intensificação do fluxo de umidade, provocado pelo aumento do gradiente de temperatura entre o ar do escoamento e o solo envolvente, foi suficiente para retirar a umidade de todas as fronteiras externas do domínio e, principalmente, aquela acumulada nos seus cantos externos, os quais neste horário contém os menores valores de umidade do solo.

As Figuras 5.40 a 5.43 revelam que a umidade migra da região próxima ao duto para as regiões mais afastadas. Esta migração de umidade, ocorre porque, nestes horários, a temperatura do escoamento é maior que a do solo. As curvas de nível da Figura 5.40 indicam que os maiores conteúdos de umidade encontram-se próximos à parte central das fronteiras externas do domínio. Isto acontece porque a fraca intensidade do fluxo de umidade desloca somente uma pequena quantidade de umidade, que se acumula mais acentuadamente nestas posições. Por este mesmo motivo, os menores valores de conteúdo de umidade se situam nos cantos externos do domínio. Em outras palavras, a intensidade do fluxo de umidade não é suficiente para afastar do duto a quantidade de umidade necessária para preencher os cantos externos do domínio que, todavia, conservam os menores conteúdos de umidade do solo.

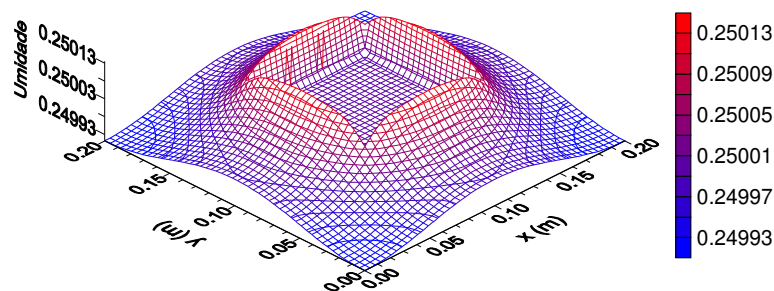


Figura 5.38 – Campo de conteúdo de umidade às 2 horas para o modelo de um duto isolado

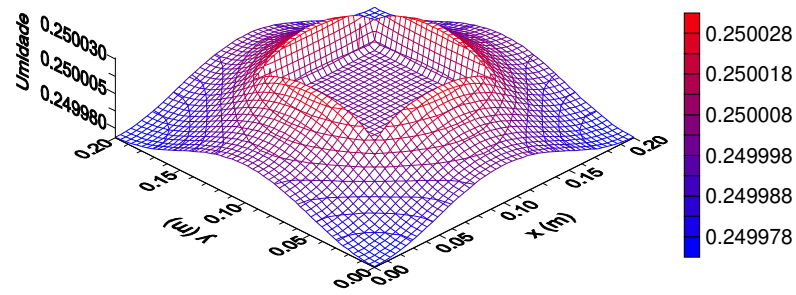


Figura 5.39 – Campo de conteúdo de umidade às 7 horas para o modelo de um duto isolado

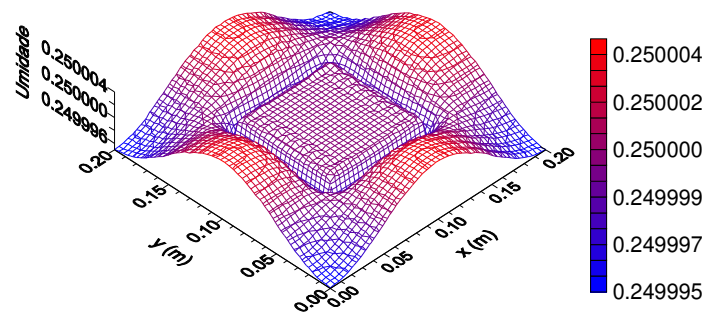


Figura 5.40 – Campo de conteúdo de umidade às 8 horas para o modelo de um duto isolado

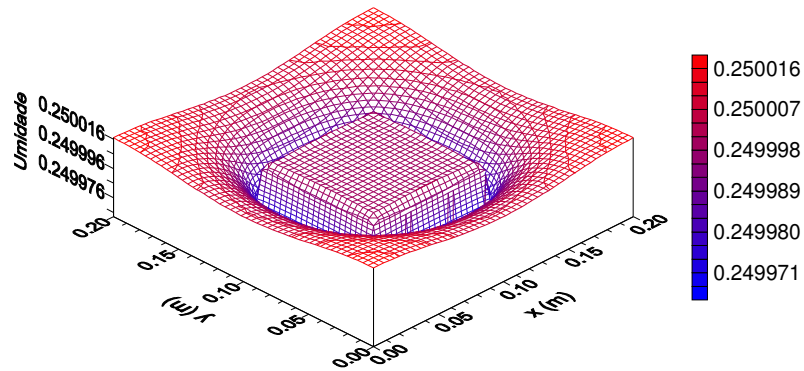


Figura 5.41 – Campo de conteúdo de umidade às 9 horas para o modelo de um duto isolado

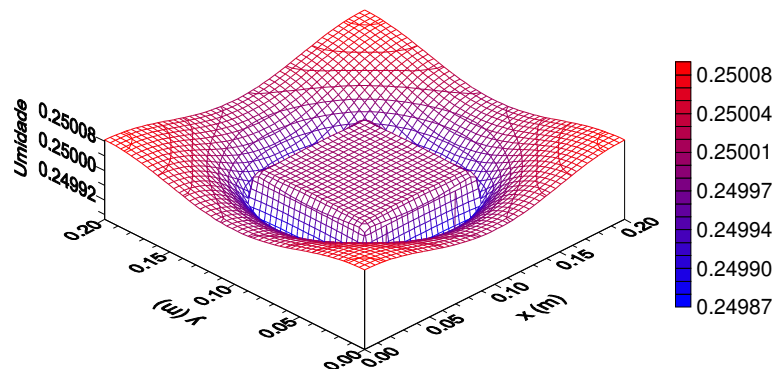


Figura 5.42 – Campo de conteúdo de umidade às 13 horas para o modelo de um duto isolado

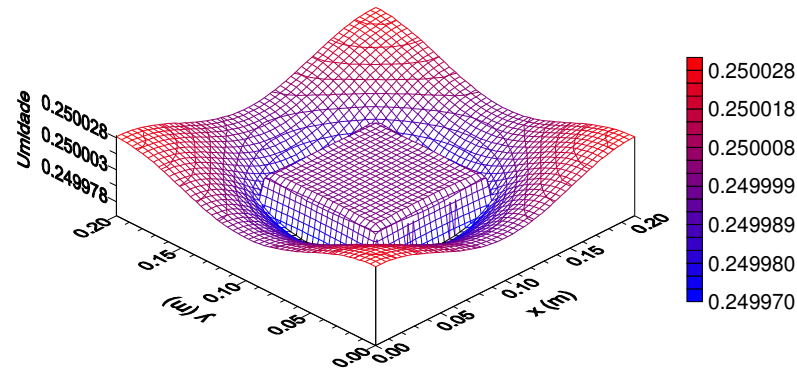


Figura 5.43 – Campo de conteúdo de umidade às 19 horas para o modelo de um duto isolado

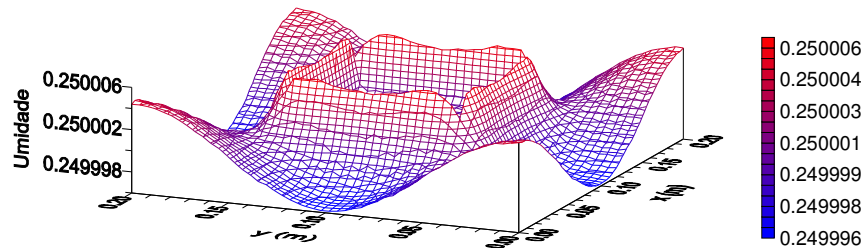


Figura 5.44 – Campo de conteúdo de umidade às 20 horas para o modelo de um duto isolado

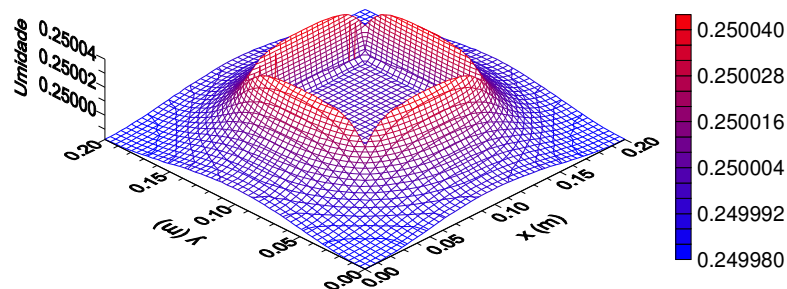


Figura 5.45 – Campo de conteúdo de umidade às 21 horas para o modelo de um duto isolado

As curvas de nível das Figuras 5.41 a 5.43 mostram que os maiores valores de conteúdo de umidade nestas situações se encontram nos cantos externos do domínio. A localização destes valores é resultante, também, do comportamento inverso que o campo de umidade tem em relação ao perfil de temperatura. Assim, em consequência do campo de temperatura para estes horários, além da migração da umidade na região próxima ao duto, verifica-se também uma acentuação da migração de umidade nas partes centrais das fronteiras externas do domínio.

A observação das variações do conteúdo de umidade apresentadas pelas Figuras 5.38 a 5.45 permite corroborar os resultados obtidos na análise das evoluções da temperatura dos pontos da Figura 5.17, ou seja, modelos de um duto isolado submetidos a uma variação periódica da temperatura com 14 °C de amplitude apresentam variações muito pequenas do conteúdo de

umidade e, portanto, não desenvolvem frentes de secagem significativas no entorno do duto. Assim sendo, a apresentação dos perfis de conteúdo de umidade para os próximos dois modelos será vista para somente um horário e para o quarto modelo serão analisados dois horários.

5.5.2 Modelo de um duto com convecção

Nesta análise são apresentados os perfis de temperatura e de conteúdo de umidade obtidos em um corte transversal na metade do comprimento do modelo de um duto com convecção, como o mostrado pela Figura 3.9. Neste modelo há uma condição de contorno convectiva na face externa norte do domínio (fronteira externa norte do solo), sendo a temperatura do meio ambiente considerada igual àquela do ar na entrada do duto, ou seja, a temperatura do meio ambiente é dada pela mesma senóide que fornece a temperatura do ar na entrada do duto. Os valores dos diferentes parâmetros utilizados na situação analisada são aqueles empregados no modelo precedente. Os critérios de escolha dos diferentes horários, onde são explorados os correspondentes campos de temperatura, são os mesmos utilizados no modelo anterior. Assim sendo, os horários da 1 e 13 horas são selecionados pelo critério das maiores diferenças entre as temperaturas do escoamento e do solo e, os horários das 6 a 9, 19, 20 e 22 horas, pelo critério de revelação das nuances dos diversos campos de temperatura analisados. Os perfis de temperatura deste modelo são influenciados por duas trocas térmicas distintas: a gerada pelo escoamento de ar dentro do duto e a produzida pela troca convectiva com o meio ambiente.

Conforme visto no modelo precedente, os campos de conteúdos de umidade mostraram pequenas variações sem apresentar acúmulos de umidade ou frentes de secagens significativas. Assim sendo, é exposto somente o perfil de conteúdo de umidade para a 1 hora.

As Figuras 5.46 a 5.54 apresentam, respectivamente, os campos de temperatura para as 1, 6, 7, 8, 9, 13, 19, 20 e 22 horas. Nas Figuras 5.46, 5.47, 5.48, 5.53 e 5.54, observa-se que, nestes horários, o escoamento recebe calor do solo. As isotermas das Figura 5.46 e 5.47 mostram que as maiores temperaturas do solo se encontram nos cantos da fronteira sul do domínio. Isto ocorre em resposta à combinação dos efeitos provocados pelos fluxos de calor que atuam no domínio. Em primeiro lugar, como nestes horários a temperatura do escoamento é menor que a do solo, o fluxo de calor correspondente à troca térmica entre o solo e o escoamento, retira calor mais acentuadamente da parte central das fronteiras internas e, principalmente, das fronteiras externas do solo, como foi discutido no modelo precedente. Conseqüentemente, os cantos externos do domínio são as posições que apresentam potencialmente os maiores valores de temperatura do solo. Em segundo lugar, o fluxo de calor associado à troca térmica entre o solo e

o ar do meio ambiente, também retira calor mais fortemente da parte central da fronteira norte do domínio. Além disso, como a ação do fluxo de calor associado à troca convectiva provoca redução na temperatura da fronteira norte do domínio, incluindo seus cantos, fica confirmado que as maiores temperaturas do solo se encontram nos cantos da fronteira sul do domínio. Por outro lado, as curvas de nível destas figuras revelam que a menor temperatura do solo se encontra na parte central da fronteira interna norte do solo, como indica a seta da primeira figura. Isto acontece porque, nesta situação, a intensidade do fluxo associado à troca convectiva com o meio ambiente não é suficiente para reduzir a temperatura do solo na parte central da fronteira norte a um valor inferior ao ocorrente na parte central da fronteira interna norte do solo. Se comparados os perfis de temperatura apresentados pelas duas figuras anteriores, verifica-se que, no horário das 6 horas, houve uma intensificação na retirada de calor de todo o domínio.

As curvas de nível da Figura 5.48 revelam que às 7 horas as maiores temperaturas do solo ainda se encontram nos cantos da fronteira sul do domínio. Observa-se ainda nesta figura que, a temperatura do escoamento é menor que a do solo envolvente, exceto na faixa de solo centralizada na região norte do domínio, localizada entre as fronteiras interna e externa norte do solo, onde ela é praticamente igual à temperatura desta faixa. Este valor da temperatura do escoamento se encontra muito próximo daquele correspondente à temperatura do meio ambiente. Assim sendo, nesta situação, verifica-se que o escoamento recebe calor do solo, exceto da faixa de solo centralizada na região norte do domínio. A razão de toda uma faixa de solo apresentar, aproximadamente, a mesma temperatura do escoamento é consequência da eminente troca de sentido do fluxo de calor associado ao próprio escoamento. Em concordância com o aumento da temperatura do ar na entrada do duto, que ocorre a partir das 4 horas, como mostra a senóide apresentada pela Figura 4.1, a capacidade do escoamento em retirar calor do solo diminui com o passar do tempo, chegando a ser nula no instante onde o fluxo térmico associado ao próprio escoamento troca de sentido. Em outras palavras, quanto mais próximo o horário estiver daquele onde o fluxo térmico inverte o sentido, mais lentamente decrescem as temperaturas dos diferentes pontos do solo. Considerando, que, no caso correspondente às 6 horas, existia uma pequena diferença de temperatura entre os pontos localizados na região norte do domínio, conclui-se que, nesta situação, o escoamento perdeu sua capacidade em retirar calor de toda uma faixa de solo dessa região, porque sua temperatura é, aproximadamente, igual a dos pontos desta faixa.

Comparando a Figura 5.53 com a associada ao horário das 19 horas (Figura 5.52), constata-se que, às 20 horas, houve troca recente no sentido do fluxo de calor entre o escoamento e o solo e que, agora, as maiores temperaturas se encontram próximas aos cantos da fronteira norte do domínio. Estas posições das maiores temperaturas decorrem da combinação dos efeitos

dos dois fluxos de calor que atuam no domínio. Primeiramente, o fluxo térmico associado ao escoamento retira calor mais acentuadamente da parte central das fronteiras internas e externas do solo. Conseqüentemente, este fluxo térmico também retira calor mais fortemente da parte central da faixa de solo centralizada na região norte do domínio, que na situação precedente possuía a maior temperatura. Em segundo lugar, o fluxo térmico associado ao meio ambiente, também, provoca uma maior redução da temperatura na parte central da referida faixa de solo. Desta forma, as retiradas de calor em ambos os lados da faixa, deslocam as maiores temperaturas para as posições acima descritas.

Na Figuras 5.54, verifica-se que as maiores temperaturas se localizam nos cantos da fronteira sul do domínio. Isto ocorre devido à diminuição simultânea das temperaturas do escoamento e do meio ambiente. A diminuição da temperatura do escoamento intensifica o correspondente fluxo térmico, que acelera a retirada de calor da parte central das fronteiras internas e, principalmente, externas do solo. Como consequência disto, as maiores temperaturas, que na situação das 20 horas ocupavam posições próximas aos cantos da fronteira externa norte do solo, serão deslocadas, potencialmente, na direção dos cantos externos do domínio. De outra parte, a redução da temperatura do meio ambiente produz um aumento na intensidade do correspondente gradiente de temperatura suficiente para rebaixar a temperatura da fronteira norte do domínio, inclusive seus cantos, restando, assim, os cantos da fronteira sul com as maiores temperaturas do domínio.

Nas Figuras 5.49 a 5.52 observa-se que a temperatura do escoamento é maior que a do solo indicando que, nestes horários, o escoamento fornece calor ao solo. Comparando o campo de temperatura apresentado pela Figura 5.49 com o correspondente às 7 horas (Figura 5.48), constata-se que houve troca no sentido do fluxo térmico associado ao escoamento. As curvas de nível desta figura revelam que os menores valores de temperatura do solo se encontram próximos aos cantos da fronteira norte do domínio. A posição destes valores resulta da combinação de efeitos produzidos, nesta hora, pelas duas trocas térmicas envolvidas. O fluxo térmico associado ao escoamento fornece calor ao solo, sendo que o faz mais acentuadamente para a parte central das suas fronteiras internas e externas, conforme foi discutido na subseção 5.5.1. Em consequência do aumento acentuado da temperatura na parte central da fronteira interna norte do solo, a menor temperatura que, na situação para as 7 horas, encontrava-se centralizada na região norte do domínio será dividida e deslocada para fora dessa região. Uma vez que, o fluxo de calor associado ao meio ambiente também fornece calor ao solo, a temperatura da fronteira norte do domínio é elevada mais intensamente na sua parte central, reforçando o deslocamento das menores temperaturas do solo para as posições acima descritas.

As isotermas da Figura 5.50 revelam que as menores temperaturas do solo situam-se

nos cantos da fronteira sul do domínio. Isto ocorre em resposta, principalmente, à ação do gradiente de temperatura associado à troca térmica entre o solo e o meio ambiente, que provocou um aumento da temperatura em todo o domínio. O campo de temperatura, por sua vez, mostrado pela Figura 5.51, é semelhante ao precedente, discrepando unicamente na ocorrência de uma maior diferença entre a temperatura do escoamento e do solo.

Observando as curvas de nível da Figura 5.52, verifica-se que, às 19 horas, o escoamento fornece calor ao solo, exceto para a faixa centralizada na região norte do domínio. A razão de toda uma faixa de solo possuir, praticamente, a mesma temperatura do escoamento decorre da eminente troca de sentido do fluxo térmico associado ao próprio escoamento. Em consonância com a diminuição da temperatura do ar na entrada do duto, que acontece desde as 16 horas, como mostra a senóide da Figura 4.1, a capacidade do escoamento em fornecer calor ao solo decresce com o passar do tempo, chegando a ser nula no instante onde o fluxo de calor associado ao próprio escoamento inverte o sentido. Considerando que, para o horário precedente, existia uma pequena diferença de temperatura entre os pontos localizados na região norte do domínio, infere-se que, nesta situação, o escoamento perdeu sua capacidade de fornecer calor a toda uma faixa de solo dessa região, porque sua temperatura é, praticamente, igual a dos pontos dessa faixa.

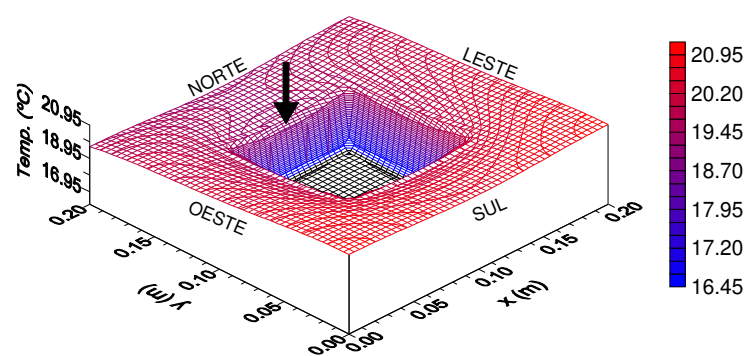


Figura 5.46 – Campo de temperatura à 1 hora para o modelo de um duto com convecção

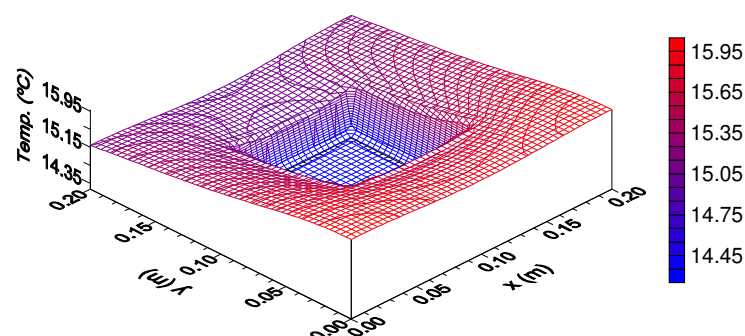


Figura 5.47 – Campo de temperatura às 6 horas para o modelo de um duto com convecção

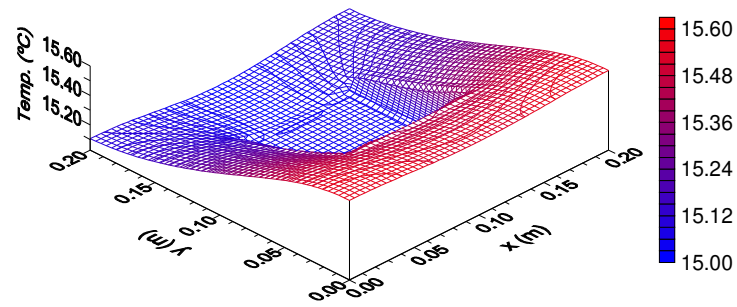


Figura 5.48 – Campo de temperatura às 7 horas para o modelo de um duto com convecção

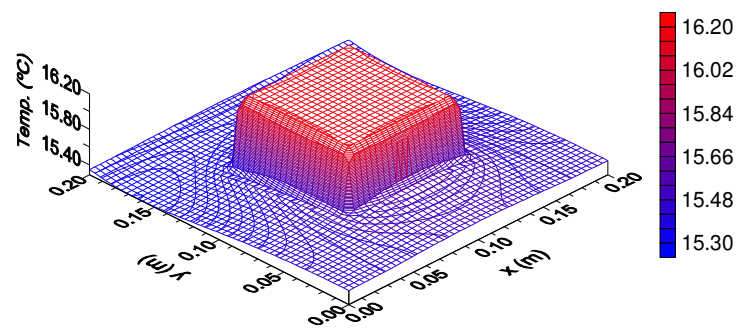


Figura 5.49 – Campo de temperatura às 8 horas para o modelo de um duto com convecção

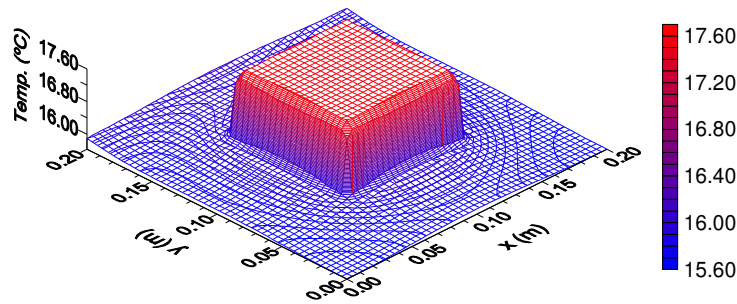


Figura 5.50 – Campo de temperatura às 9 horas para o modelo de um duto com convecção

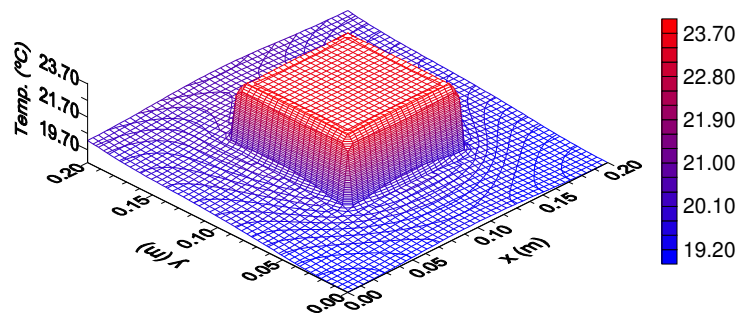


Figura 5.51 – Campo de temperatura às 13 horas para o modelo de um duto com convecção

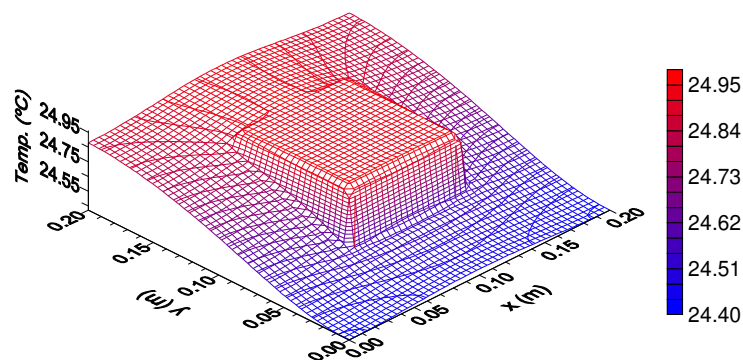


Figura 5.52 – Campo de temperatura às 19 horas para o modelo de um duto com convecção

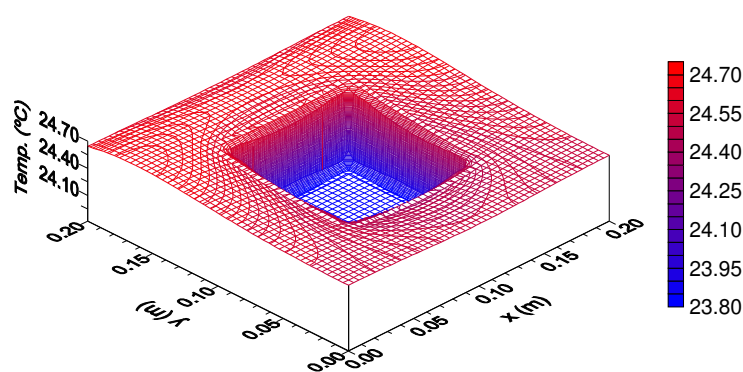


Figura 5.53 – Campo de temperatura às 20 horas para o modelo de um duto com convecção

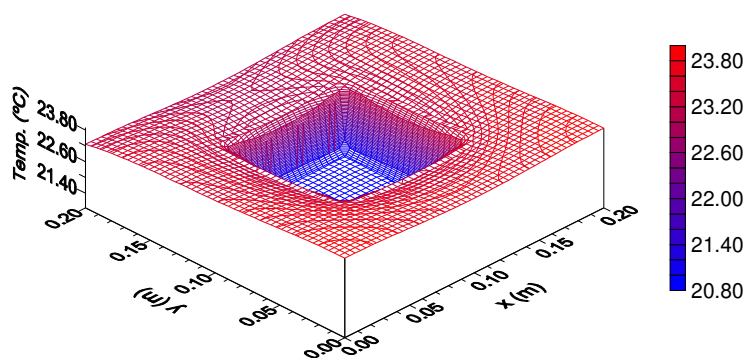


Figura 5.54 – Campo de temperatura às 22 horas para o modelo de um duto com convecção

O próximo campo a ser apresentado corresponde ao perfil de conteúdo de umidade à 1 hora, que é mostrado na Figura 5.55. Nesta figura, verifica-se acúmulos de umidade na região próxima ao duto e, também, na fronteira norte do solo. Estes acúmulos ocorrem porque, neste horário, tanto a temperatura do escoamento como a do meio ambiente são menores que a do solo. As curvas de nível desta figura revelam que os menores conteúdos de umidade do solo se situam

nos cantos da fronteira sul do domínio. Isto acontece como consequência da ação conjunta dos dois fluxos de umidade que atuam no domínio. O fluxo mássico, gerado pela troca de calor entre o solo e o escoamento, produz a migração da umidade situada na região mais afastada para a região próxima ao duto, sendo que esta migração é mais intensa nos cantos internos e, principalmente, nos externos do solo, devido ao comportamento inverso que o perfil de umidade possui em relação ao campo de temperatura, como foi visto no modelo precedente. Desta forma, os cantos externos do domínio e a parte central das fronteiras internas do solo são as posições com potencial de conter os menores e os maiores conteúdos de umidade, respectivamente. Além disso, o fluxo mássico, produzido pela troca térmica entre o solo e o meio ambiente, provoca acúmulo de umidade em toda a fronteira norte do domínio, sendo mais acentuado na sua parte central. Assim sendo, este fluxo de umidade produz dois resultados. O primeiro, é que o aumento da umidade nos cantos da fronteira externa norte do solo, confirma que os menores conteúdos de umidade se situam nos cantos da fronteira sul do domínio. O segundo resultado, diz respeito ao reforço no acúmulo de umidade que a fronteira interna norte do solo recebe, transformando seu ponto central (indicado pela seta) no local onde se encontra o maior conteúdo de umidade do solo.

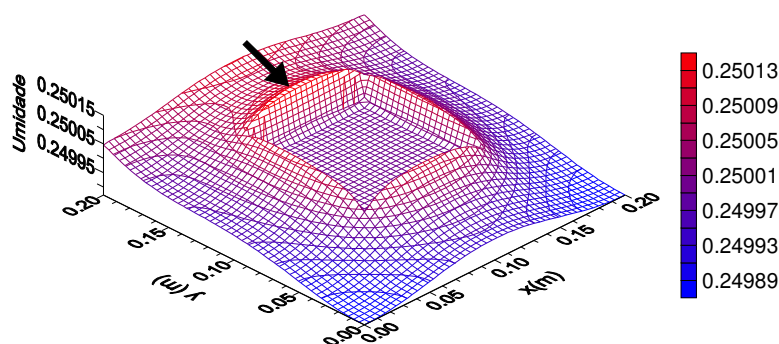


Figura 5.55 – Campo de conteúdo de umidade à 1 hora para o modelo de um duto com convecção

5.5.3 Modelo de dois dutos isolados

Nesta subseção são apresentados e analisados os campos de temperatura e de conteúdo de umidade encontrados em um corte transversal efetuado na metade do comprimento do modelo de dois dutos isolados, como o mostrado na Figura 3.10. Os valores dos diferentes parâmetros utilizados na situação analisada deste modelo são os mesmos empregados nos dois

modelos já estudados neste capítulo.

Na situação explorada neste modelo, são selecionados os horários das 2 e 14 horas conforme o critério das maiores diferenças entre as temperaturas dos escoamentos e do solo e, os horários das 7, 8, 9, 19 e 20 horas, segundo o critério de expor as nuances dos diferentes campos analisados. Uma vez que para as variações de temperatura submetidos os diferentes modelos não apresentaram variações significativas nos perfis de conteúdo de umidade, esta análise é centrada somente no campo de umidade correspondente ao horário das 2 horas.

As Figura 5.56 a 5.62 exibem os campos de temperatura correspondentes aos horários das 2, 7, 8, 9, 14, 19 e 20 horas, respectivamente. As Figuras 5.56, 5.57 e 5.62 apresentam os perfis onde os escoamentos recebem calor do solo envolvente. As isothermas das Figuras 5.56 e 5.57 revelam que as maiores temperaturas do solo se encontram simetricamente distribuídas nos cantos externos e nas partes centrais das fronteiras leste e oeste do domínio. Isto ocorre porque existe uma troca de calor mais intensa nas partes centrais das fronteiras internas do solo, como foi discutido nos dois modelos precedentes, ao abordar os efeitos que a forma quadrada da seção transversal do domínio produz na transferência de calor entre o escoamento e o solo. Por este mesmo motivo, as menores temperaturas do solo se situam nas partes centrais de suas fronteiras internas. A diferença entre as temperaturas dos escoamentos e do solo é a única divergência entre os campos mostrados pelas figuras anteriores, sendo que esta diferença é muito pequena para a situação correspondente às 7 horas, porque o fluxo de calor associado à troca convectiva entre os escoamentos e o solo está prestes a trocar de sentido. Por outro lado, o formato das curvas de nível da Figura 5.62 indica que a retirada de calor do solo, realizada pelos escoamentos, ainda não atingiu as fronteiras externas do domínio. Desta forma, todas estas fronteiras possuem a maior temperatura do domínio, visto que a intensidade dos fluxos térmicos associados aos escoamentos não é suficiente para retirar calor das regiões mais afastadas do domínio.

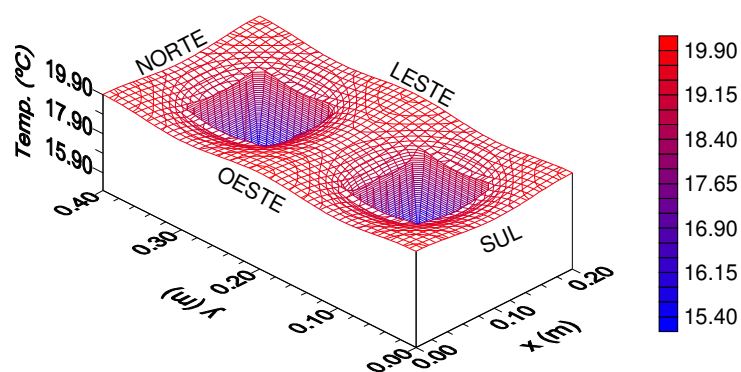


Figura 5.56 – Campo de temperatura às 2 horas para o modelo de dois dutos isolados

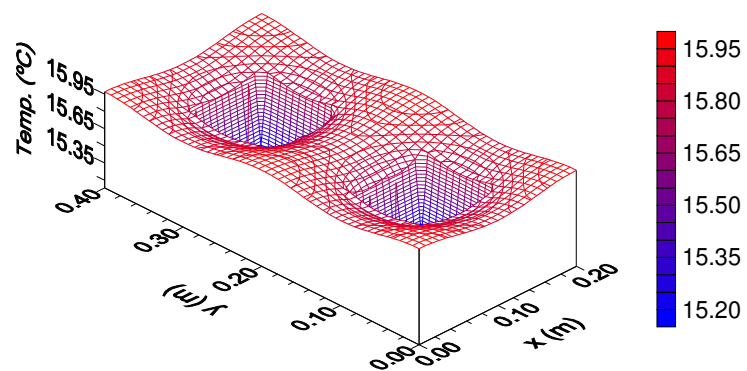


Figura 5.57 – Campo de temperatura às 7 horas para o modelo de dois dutos isolados

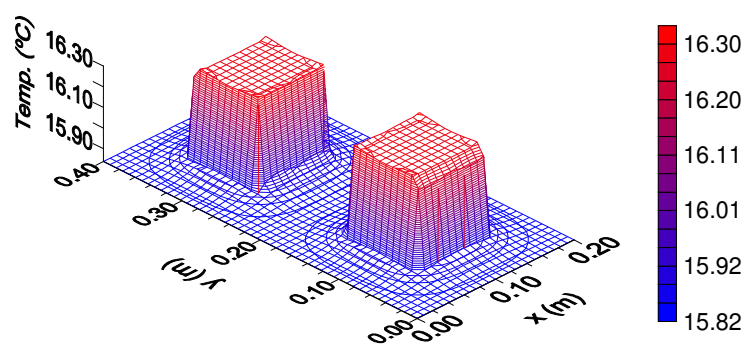


Figura 5.58 – Campo de temperatura às 8 horas para o modelo de dois dutos isolados

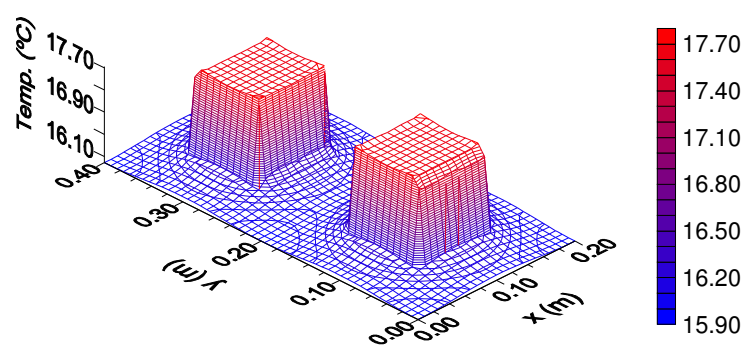


Figura 5.59 – Campo de temperatura às 9 horas para o modelo de dois dutos isolados

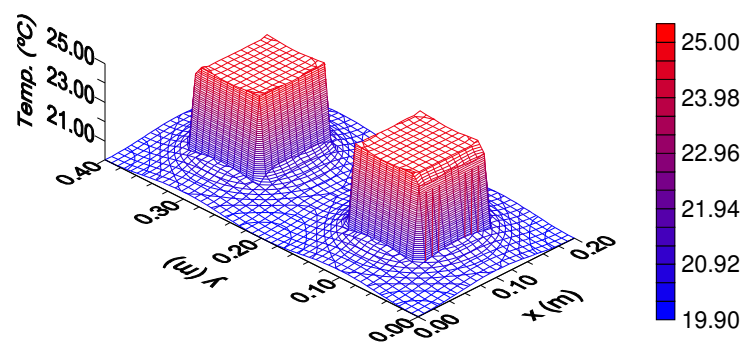


Figura 5.60 – Campo de temperatura às 14 horas para o modelo de dois dutos isolados

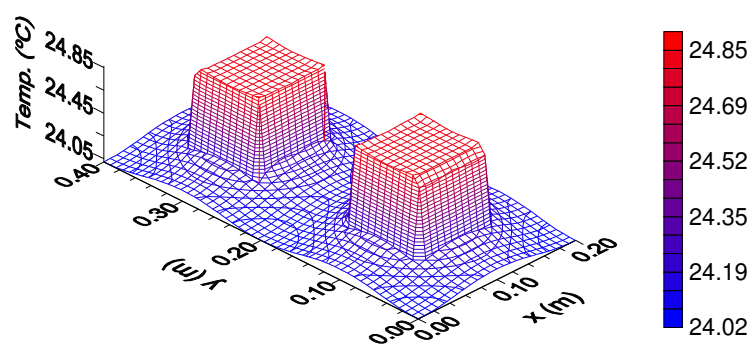


Figura 5.61 – Campo de temperatura às 19 horas para o modelo de dois dutos isolados

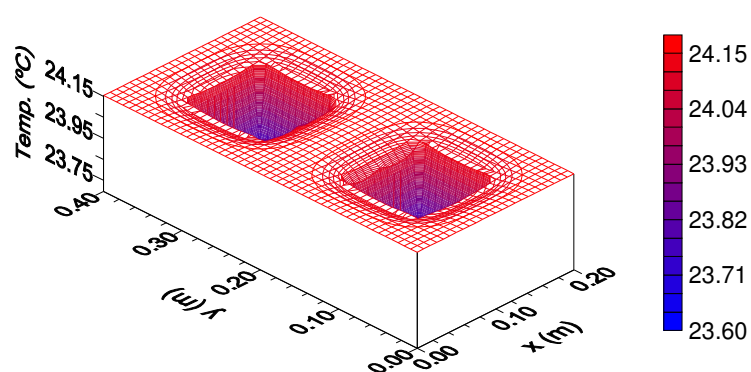


Figura 5.62 – Campo de temperatura às 20 horas para o modelo de dois dutos isolados

As Figuras 5.58 a 5.61 mostram que, nestes horários, os escoamentos fornecem calor ao solo. As isotermas da Figura 5.58 indicam que a difusão de calor proveniente dos escoamentos ainda não alcançou as fronteiras externas do domínio, porque estas fronteiras possuem a mesma temperatura. Por sua vez, as curvas de nível das Figuras 5.59 a 5.61 revelam que os menores valores de temperatura do solo se concentram nos cantos externos e nas partes centrais das fronteiras leste e oeste do domínio. Esta disposição resulta da acentuação das trocas térmicas nas partes centrais das fronteiras internas do solo.

O próximo campo a ser apresentado corresponde ao perfil de conteúdo de umidade às 2 horas, mostrado pela Figura 5.63. Nesta figura, verifica-se que há migração da umidade nas regiões afastadas dos dutos e, conseqüentemente, acúmulo nas suas regiões próximas. Este acúmulo ocorre porque, nesta hora, as temperaturas dos escoamentos são menores que a do solo. As curvas de nível desta figura indicam que os menores conteúdos de umidade se encontram nos cantos externos do domínio e nas partes centrais das suas fronteiras leste e oeste. Isto acontece porque o perfil de umidade tem um comportamento inverso ao do campo de temperatura, como foi discutido nos modelos precedentes. Além disso, pelo mesmo motivo, os maiores valores de conteúdo de umidade se situam na parte central das fronteiras internas do solo.

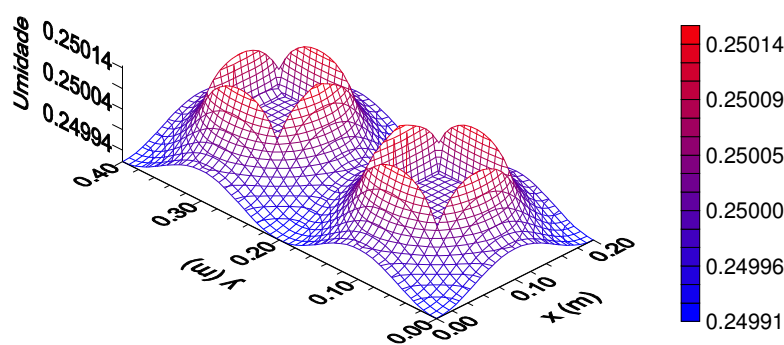


Figura 5.63 – Campo de conteúdo de umidade às 2 horas para o modelo de dois dutos isolados

5.5.4 Modelo de dois dutos com convecção

A seguir, são analisados os perfis de temperatura e de conteúdo de umidade encontrados em um corte transversal na metade do comprimento do modelo de dois dutos com convecção, como o apresentado pela Figura 3.12. Também, nesta subsecção é analisado o campo de temperatura em um corte transversal na saída dos dutos deste modelo. O modelo apresenta uma condição de contorno convectiva na face externa norte do domínio (fronteira externa norte do solo), sendo a temperatura do meio ambiente obtida pela mesma senóide que fornece a temperatura do ar nas entradas dos dutos. Os valores dos diferentes parâmetros empregados na simulação deste modelo são os mesmos empregados nos modelos analisados anteriormente.

De forma análoga aos modelos precedentes, os horários das 2 e 14 horas são selecionados pelo critério das maiores diferenças entre as temperaturas dos escoamentos e do solo e os horários das 6, 7, 8, 9, 10, 18, 19, 20, 21 e 23 horas pelo critério de mostrar as nuances dos diferentes campos de temperatura analisados. Nesta subsecção serão explorados, também, os campos de conteúdo de umidade correspondentes aos horários das 2 e 6 horas.

Para facilitar a apresentação dos resultados nesta subsecção, optou-se por fornecer denominações diferentes a cada duto e a cada correspondente região do modelo analisado. O duto situado na região norte do domínio, aquele que possui uma condição de contorno convectiva com o meio ambiente, será denominado a partir de agora de "primeiro duto" e a região do solo envolvente deste duto será denominada de "primeira região"; o duto situado na região sul do domínio será denominado a partir de agora de "segundo duto" e a região do solo que envolve este duto será denominada de "segunda região".

As Figuras 5.64 a 5.75 exibem os campos de temperatura às 2, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 18, 19, 20, 21 e 23 horas, respectivamente. Os perfis apresentados pelas Figuras 5.64 a 5.66 e 5.73 a 5.75 mostram que nestes horários os escoamentos de ar recebem calor do solo. As isotermas,

expostas pelas Figuras 5.64, 5.65 e 5.75, revelam que a menor temperatura do solo encontra-se na parte central da fronteira norte do primeiro duto, como indica a seta da primeira destas figuras. Em contraposição, as maiores temperaturas do solo apresentadas por estas figuras se encontram nos cantos externos da fronteira sul do domínio. As posições, tanto da menor como das maiores temperaturas do solo, devem-se à combinação dos efeitos que os fluxos de calor, associados aos escoamentos e ao meio ambiente, realizam sobre o domínio de forma quadrada, como foi discutido nos modelos anteriores. Comparando os campos de temperatura correspondentes às 23, 2 e 6 horas, verifica-se que houve intensificação na retirada de calor que o meio ambiente realiza na fronteira norte do domínio.

As curvas de nível da Figura 5.66 mostram que, as temperaturas dos escoamentos ainda são inferiores à do solo, exceto na faixa de solo centralizada na fronteira norte do primeiro duto, onde as temperaturas do fluxo de ar e do solo são semelhantes. Como foi analisado no modelo de um duto com convecção, toda esta faixa de solo não realiza troca térmica com o escoamento do primeiro duto. As Figuras 5.73 e 5.74, por sua vez, revelam as formas que os campos de temperatura assumem para os correspondentes horários. Nestes campos, ressalta-se a posição que as maiores temperaturas ocupam próximas aos cantos da fronteira norte do domínio. Isto ocorre devido às retiradas de calor provocadas pelos fluxos térmicos associados ao primeiro escoamento e, principalmente, ao meio ambiente, conforme foi discutido no modelo de um duto com convecção.

Os perfis de temperaturas apresentados pelas Figuras 5.67 a 5.72 indicam que, nestes horários, os escoamentos fornecem calor ao solo. Na seqüência dos campos de temperatura destas figuras, ressalta-se, principalmente, o aumento da temperatura do meio ambiente e sua influência no posicionamento das menores e maior temperaturas do domínio. As menores temperaturas, que, no horário das 8 horas, situavam-se próximos aos cantos externos da fronteira norte do domínio, deslocam-se até a metade das fronteiras leste e oeste do solo para horários intermediários e chegam aos cantos externos da fronteira do domínio para as 19 horas. Em contraste, a maior temperatura que, no primeiro horário desta seqüência de campos, encontrava-se adjacente à parte central da fronteira sul do segundo duto, das 10 às 18 horas, desloca-se para a parte central da fronteira norte do domínio, como mostram as setas das figuras correspondentes. Além disso, para o horário das 19 horas se observa que em uma faixa de solo centralizada na região norte do primeiro duto ocorre a maior temperatura do domínio.

Finalmente, cabe aqui ressaltar que, para os horários das 24 e 1 hora, os quais completam o ciclo de 24 horas da senóide utilizada para simular a variação da temperatura ambiente e na entrada dos dutos, os campos de temperatura evoluem gradativamente até chegar ao apresentado pela Figura 5.64.

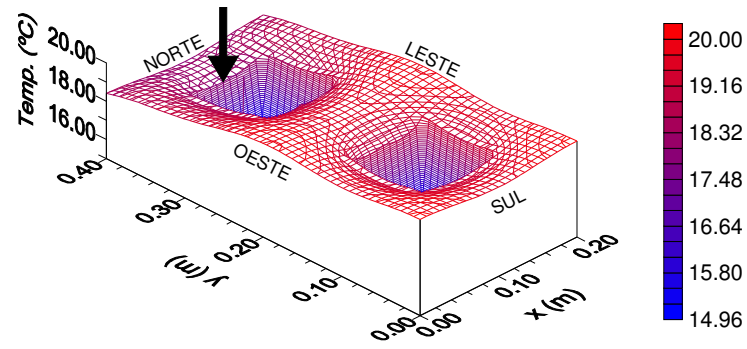


Figura 5.64 – Campo de temperatura às 2 horas para o modelo de dois dutos com convecção

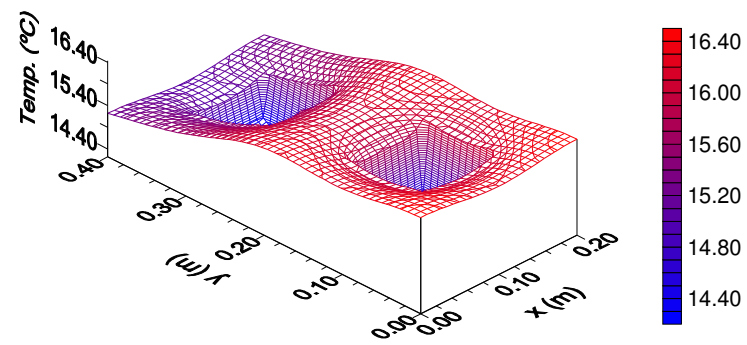


Figura 5.65 – Campo de temperatura às 6 horas para o modelo de dois dutos com convecção

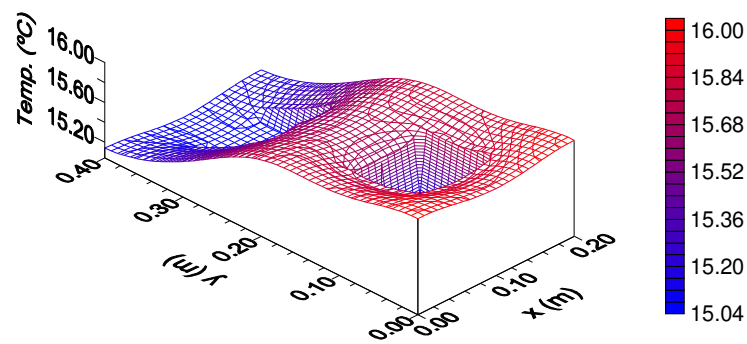


Figura 5.66 – Campo de temperatura às 7 horas para o modelo de dois dutos com convecção

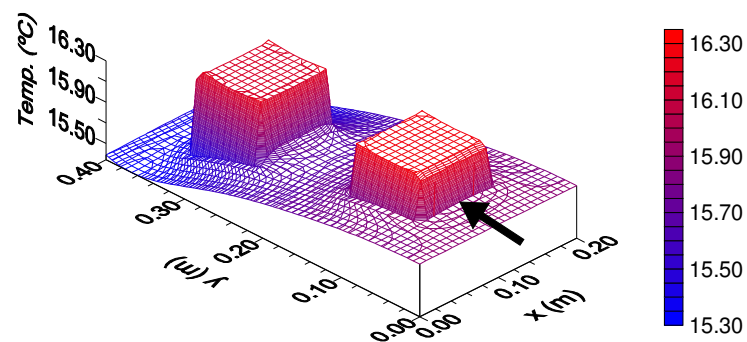


Figura 5.67 – Campo de temperatura às 8 horas para o modelo de dois dutos com convecção

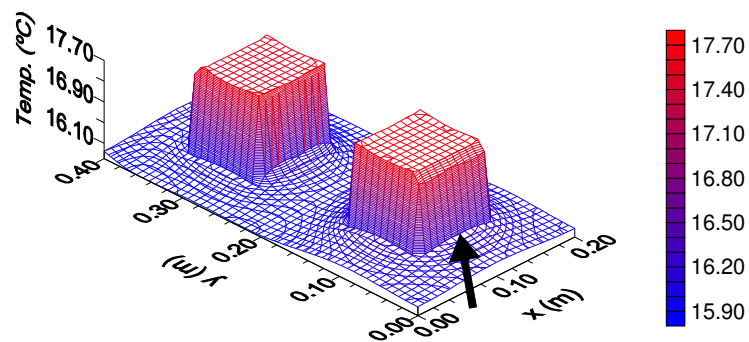


Figura 5.68 – Campo de temperatura às 9 horas para o modelo de dois dutos com convecção

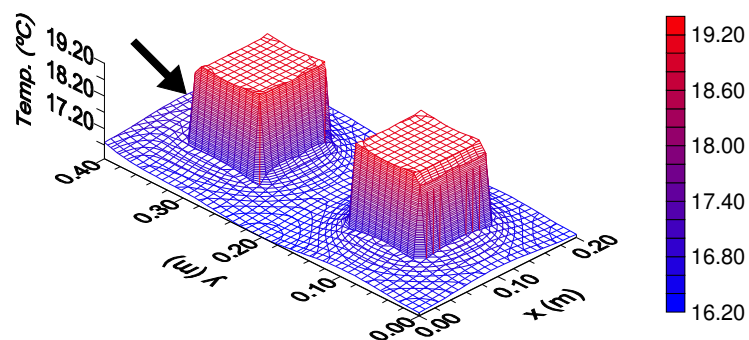


Figura 5.69 – Campo de temperatura às 10 horas para o modelo de dois dutos com convecção

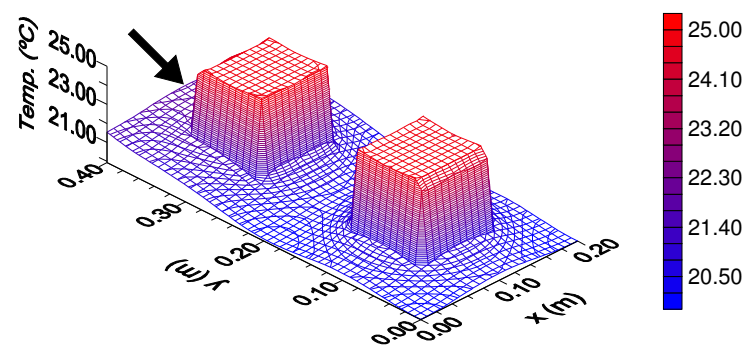


Figura 5.70 – Campo de temperatura às 14 horas para o modelo de dois dutos com convecção

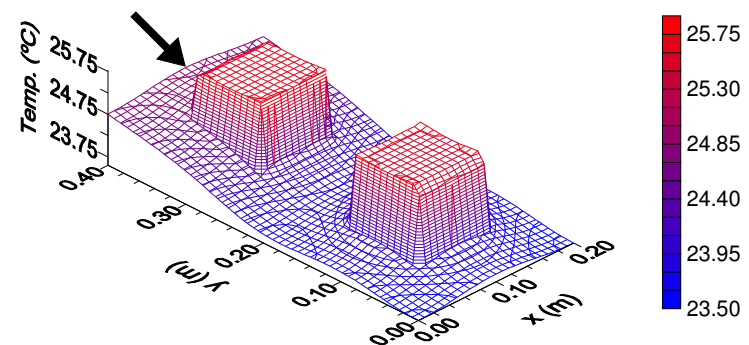


Figura 5.71 – Campo de temperatura às 18 horas para o modelo de dois dutos com convecção

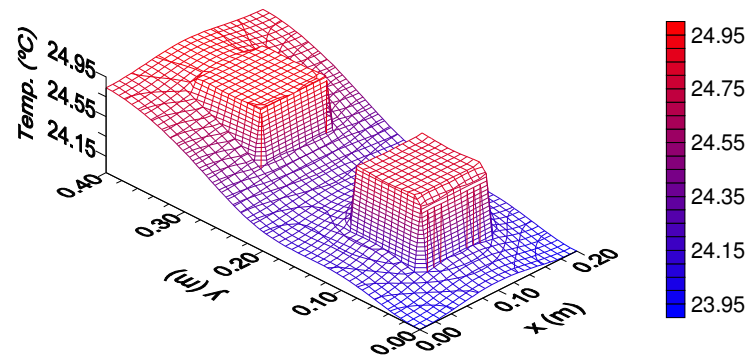


Figura 5.72 – Campo de temperatura às 19 horas para o modelo de dois dutos com convecção

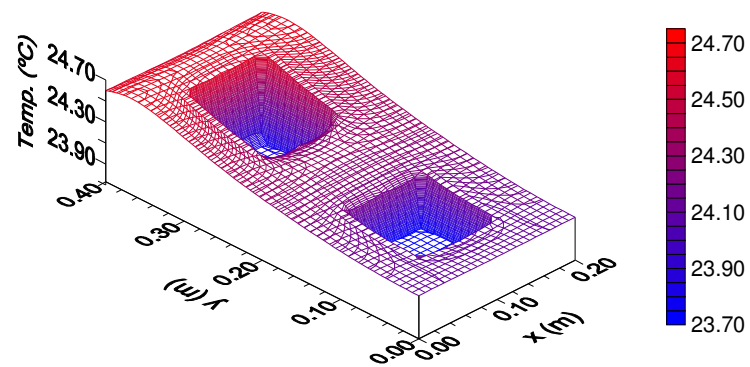


Figura 5.73 – Campo de temperatura às 20 horas para o modelo de dois dutos com convecção

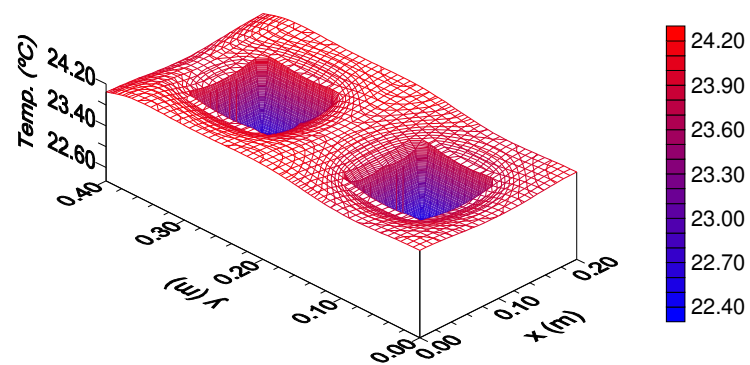


Figura 5.74 – Campo de temperatura às 21 horas para o modelo de dois dutos com convecção

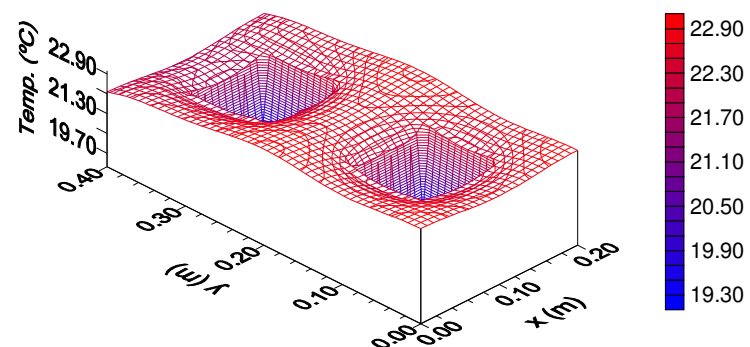


Figura 5.75 – Campo de temperatura às 23 horas para o modelo de dois dutos com convecção

A Figura 5.76 apresenta o campo de conteúdo de umidade para as 2 horas, onde verifica-se que há acúmulo de umidade tanto na fronteira norte do domínio como nas duas regiões próximas aos dutos. Isto ocorre porque tanto a temperatura ambiente como a dos escoamentos é menor que a do solo. Além disso, nota-se que os maiores níveis relativos de conteúdo de umidade encontram-se nas partes centrais de todas as fronteiras internas do solo, o que acontece devido à forma quadrada do domínio, conforme foi comentado anteriormente. Em contraposição, as curvas de nível desta figura mostram que os menores conteúdos de umidade situam-se na parte central das fronteiras leste e oeste do domínio. É importante salientar que a análise isolada deste último resultado poderia induzir à conclusão de que as maiores temperaturas do solo estariam situadas exatamente sobre as regiões com menores níveis relativos de umidade, o que não acontece, pois, como foi visto na Figura 5.64, as maiores temperaturas do solo estão localizadas nos cantos da fronteira sul do domínio. A localização dos menores conteúdos de umidade, apresentada pela Figura 5.76, ocorre porque a intensidade dos gradientes de temperatura que, neste horário, atuam nos cantos da fronteira externa sul do domínio não são suficientes para retirar a umidade dessas posições em níveis abaixo daquele já existente na parte central das fronteiras leste e oeste do domínio.

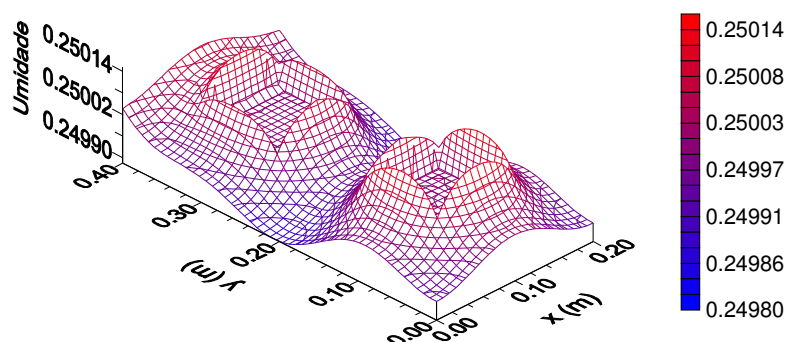


Figura 5.76 – Campo de conteúdo de umidade às 2 horas para o modelo de dois dutos com convecção

A Figura 5.77 mostra a vista yz do perfil do conteúdo de umidade às 2 horas, onde verifica-se que o maior conteúdo de umidade se encontra adjacente à parte central da fronteira sul do segundo duto. Neste detalhe do perfil do conteúdo de umidade, ao comparar os volumes acima de um plano horizontal de cota 0,25 (conteúdo de umidade inicial) das duas regiões do modelo, representados pelas áreas da primeira e da segunda região localizados acima da reta tracejada, observa-se que eles são quase equivalentes. Isto significa que, neste horário, o acúmulo de umidade encontra-se distribuído de forma equitativa entre a primeira e a segunda região.

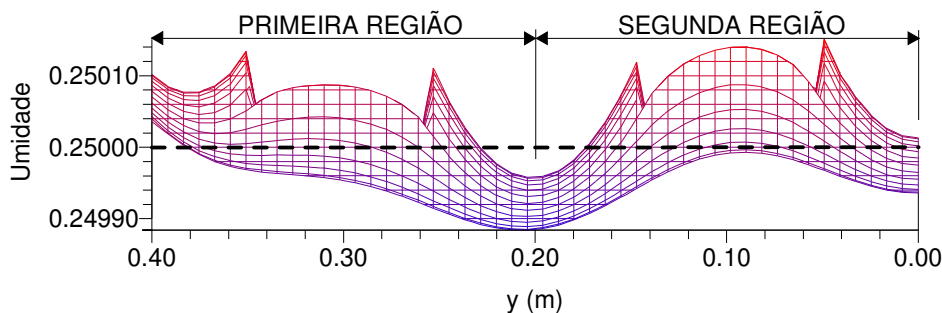


Figura 5.77 – Vista yz do campo de conteúdo de umidade às 2 horas

Como foi dito, todas as fronteiras do domínio são impermeáveis à passagem de umidade e esta desloca-se de acordo com os diferentes gradientes de temperatura atuantes nas duas regiões, sendo que estes deslocamentos ocorrem dentro das regiões e de uma região para a outra.

Na Figura 5.78, observa-se que às 6 horas continua havendo acúmulo de umidade nas duas regiões próximas aos dutos, já que neste horário as temperaturas dos dois escoamentos são menores que a do solo. Por outro lado, verifica-se que os menores conteúdos de umidade permanecem na posição central das fronteiras leste e oeste do domínio. Porém, as curvas de nível desta figura revelam que houve um aparente aumento do conteúdo de umidade na primeira região.

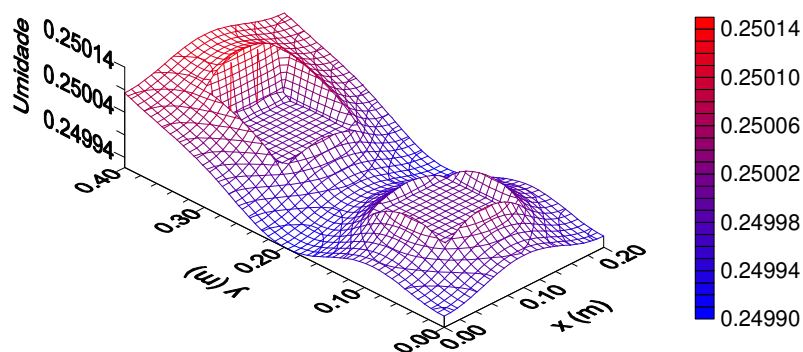


Figura 5.78 – Campo de conteúdo de umidade às 6 horas para o modelo de dois dutos com convecção

A Figura 5.79 apresenta a vista yz do campo do conteúdo de umidade às 6 horas, onde verifica-se que o maior nível do conteúdo de umidade se encontra adjacente ao centro da fronteira norte do primeiro duto. Outrossim, realizando uma análise comparativa entre os volumes posicionados acima do plano horizontal de cota 0,25, observa-se que o volume da primeira região é bem maior que o da segunda região, indicando que, neste horário, há migração de umidade da segunda para a primeira região.

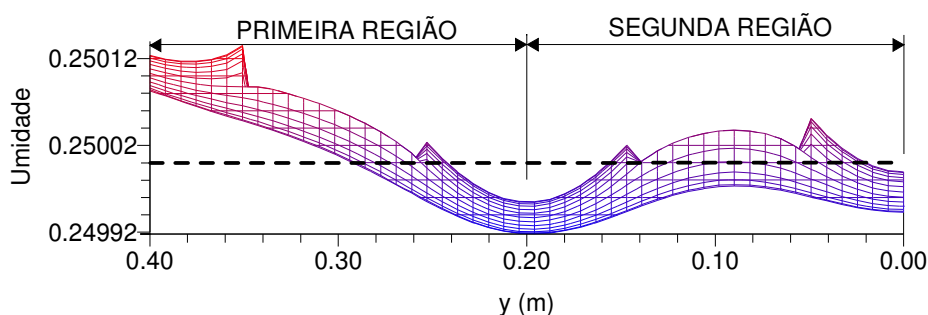


Figura 5.79 – Vista yz do campo de conteúdo de umidade às 6 horas

Ao comparar as Figuras 5.77 e 5.79, verifica-se que a maior intensidade dos gradientes de temperatura atuantes na segunda região, no horário das 6 horas, provocaram um deslocamento de parte da umidade da segunda para a primeira região, produzindo, assim, um maior acúmulo de umidade na primeira região.

As Figuras 5.64 a 5.79 mostraram os campos de temperatura e de umidade em um corte transversal na metade do modelo de dois dutos com convecção. Em particular, no que diz respeito às temperatura dos escoamentos os perfis de temperatura analisados não apresentaram diferenças significativas entre eles. Assim, visando explorar com maior detalhe esta diferença de temperatura entre os escoamentos ao longo dos dutos do modelo com convecção, na seqüência, é apresentado o campo de temperatura correspondente a um corte transversal na saída dos dutos deste modelo. Os valores dos parâmetros adotados na simulação deste último caso do modelo de dois dutos com convecção são os mesmos empregados no caso precedente, exceto o comprimento dos dutos, que é de 20 metros. Na Figuras 5.80, que apresenta o campo de temperatura às 19 horas, verifica-se que os escoamentos fornecem calor ao solo, porém não é possível visualizar a diferença de temperatura existente entre os dois escoamentos.

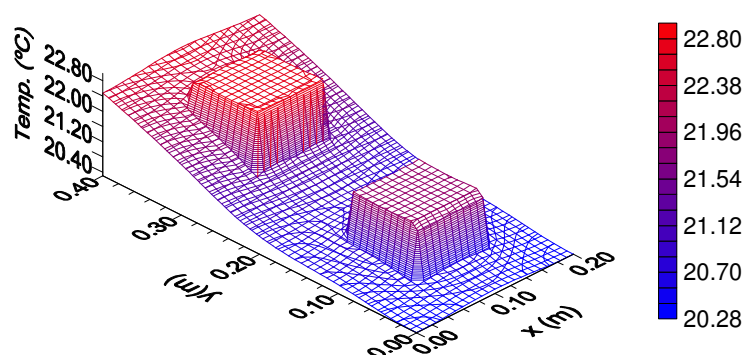


Figura 5.80 – Campo de temperatura às 19 horas em um corte na saída do modelo

A utilização da vista yz do campo de temperatura às 19 horas, apresentada pela Figura 5.81, permite observar que a temperatura de escoamento do primeiro duto é maior

que a do segundo duto, sendo a diferença entre as temperaturas dos escoamentos de aproximadamente $0,80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

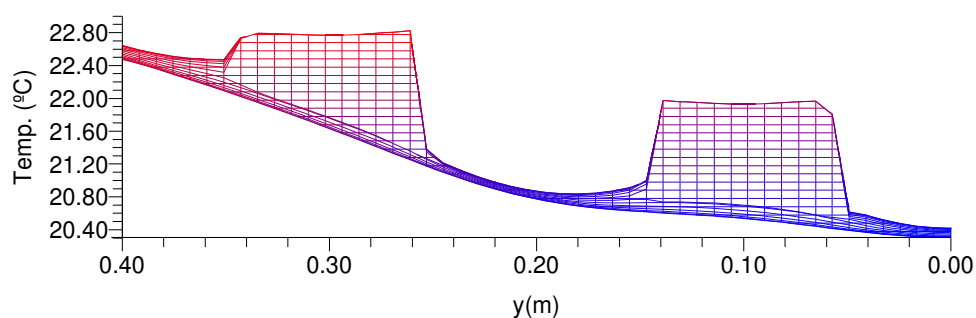


Figura 5.81 – Vista yz do campo de temperatura às 19 horas em um corte na saída do modelo

Como foi discutido ao analisar as Figuras 5.29 e 5.30, a diferença de temperatura entre os escoamentos do primeiro e do segundo duto é maior quanto mais distante se encontrar o corte transversal xy das entradas dos escoamentos. Esta diferença de temperatura ocorre porque na posição do corte transversal, neste caso na saída dos dutos, o fluxo de calor associado à troca convectiva com o meio ambiente é predominante em relação aos fluxos de calor associados aos escoamentos internos de ar. Assim, o fato de que o corte transversal é realizado na saída do modelo com um comprimento de 20 metros, justifica que a diferença entre as temperaturas dos escoamentos alcance $0,80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho utilizou a simulação numérica para resolver o problema transiente periódico e tridimensional da transferência simultânea de calor e umidade em solos insaturados que envolvem dutos enterrados. Foi utilizada a formulação clássica proposta por Philip e De Vries, 1957, para o transporte de calor e massa em meios porosos não-saturados. A resolução numérica dos quatro modelos computacionais analisados foi realizada usando o Método dos Volumes Finitos, sendo efetuada a resolução do sistema de equações diferenciais governantes utilizando o algoritmo da matriz tri-diagonal.

Os resultados dos calores volumétricos armazenados no solo obtidos pelo modelo que reproduz aquele de um duto isolado apresentado por Gauthier *et alli*, 1997, encontram-se muito próximos dos resultados obtidos pelos citados autores para as mesma situações. O estudo mostrou que, para distâncias entre centros de 0,25 m e de 0,40 m, os valores dos calores volumétricos armazenados no solo pelos dois modelos apresentaram uma ótima concordância. Mesmo para as situações correspondentes a uma distância entre centros de 0,55 m a maior diferença percentual entre os calores volumétricos armazenados no solo, que ocorre para um comprimento do duto de 5 metros, foi no máximo de 6,24 %. Desta forma, o ótimo ajuste dos resultados obtidos para todas estas situações, permite validar a metodologia numérica proposta.

A análise dos dois tipos de gráficos utilizados no estudo de comparação entre o modelo do cabo de seção transversal quadrada com o modelo do cabo de potência, apresentado por Damasceno Ferreira, 1993, revelou que, para as diferentes simulações realizadas usando três conteúdos iniciais de umidade e três valores de potência dissipada nos cabos não houve diferença significativa tanto nas distribuições de temperatura como nas distribuições de conteúdo de umidade de ambos os modelos. Assim, estes resultados mostraram que a simplificação proposta por Gauthier *et alli*, 1997, de modelar dutos circulares como dutos de seção transversal quadrada de área equivalente, pode ser estendida para o caso de cabos circulares, que podem ser substituídos por cabos de seção transversal quadrada de área equivalente.

Os resultados obtidos para os diferentes valores dos parâmetros dos quatro modelos computacionais investigados mostraram que o calor volumétrico armazenado no solo:

- cresce logaritmicamente com o aumento da velocidade do escoamento e com a diminuição do comprimento e da distância entre centros dos dutos. Entretanto, este crescimento é enfraquecido com o aumento do diâmetro do duto;

- cresce com o aumento do conteúdo de umidade até que ele alcance o valor inicial de 0,25, porém este crescimento é desacelerado pelo aumento do comprimento e da distância entre

centros dos dutos.

Visando melhorar o sistema de troca térmica dos modelos computacionais analisados, foram selecionados os denominados valores e intervalos de valores recomendados para os parâmetros do modelo de um duto isolado, os quais contribuem significativamente no aumento de calor volumétrico armazenado no solo deste modelo. Assim sendo, para um diâmetro de 0,1 m foram escolhidos os seguintes valores (ou intervalos de valores) recomendados: de 4 m/s para a velocidade do escoamento interno dentro do duto, de 0,25 para o conteúdo de umidade do solo, de 5 até 20 metros para o comprimento do duto e de 0,20 até 0,30 m para a distância entre centros. O uso destes mesmos valores (ou intervalos de valores) recomendados nos outros três modelos computacionais mostrou que sua utilização aumentou significativamente o calor volumétrico armazenado por estes modelos.

A análise das combinações de parâmetros que produzem calores volumétricos equivalentes armazenados no solo permite concluir que, se no dimensionamento do modelo de um duto isolado, que também pode ser estendido para um sistema trocador-armazenador de calor no solo, existir alguma restrição quanto o uso de um determinado comprimento recomendado do duto, as alternativas para obter-se calor volumétrico equivalente armazenado no solo para praticamente todos os níveis de umidade avaliados são: dividir pela metade o comprimento recomendado e o diâmetro do duto do modelo (ou duplicá-los) e adotar uma distância entre centros conveniente.

A comparação entre os calores volumétricos armazenados no solo obtidos empregando a resolução acoplada de energia e de umidade e aqueles conseguidos aplicando a resolução da equação da temperatura para um modelo de um duto isolado, que visa quantificar o valor da parcela correspondente ao calor que é transportado em decorrência dos gradientes de umidade, mostrou que as diferenças percentuais entre os calores volumétricos armazenados pelos dois tipos de resolução são desprezíveis. Isto indica que, em um modelo de um duto isolado submetido a uma variação periódica da temperatura interna da estufa dada por uma senóide com uma amplitude de 14 °C, o valor da parcela correspondente ao calor transportado pela difusão da umidade é bem inferior ao alegado pela bibliografia. Como consequência disto, pode-se concluir que:

- se o objetivo das simulações é determinar somente a quantidade de calor volumétrico armazenado no solo, o mais conveniente é resolver somente a equação de energia, pois a resolução acoplada da temperatura com a umidade, além de não influenciar significativamente no resultado, aumenta em mais de três vezes o tempo de simulação;

- se o objetivo das simulações, além de determinar a quantidade de calor volumétrico armazenado no solo, é também verificar o campo de umidade, o modelo será simulado

empregando a resolução acoplada da temperatura com a umidade.

A utilização de senóides com amplitudes de 14 a 50 °C, também não produz diferença percentual significativa entre o calor volumétrico armazenado no solo empregando a resolução acoplada da energia e da umidade e a resolução da equação da temperatura, uma vez que o maior valor da diferença percentual encontrado também foi insignificante.

Existe uma correlação linear direta entre a amplitude da senóide, utilizada para simular a temperatura do meio ambiente durante um período de 24 horas, e o calor volumétrico armazenado no solo pelos modelos de um duto isolado, de um duto com convecção e de dois dutos com convecção. A determinação desta correlação linear pode ser utilizada para realizar previsões da quantidade de calor volumétrico armazenado no solo para os modelos anteriores empregando senóides com amplitudes diferentes daquelas utilizadas neste estudo.

Pela comparação entre os calores volumétricos armazenados resultantes das simulações efetuadas nos quatro modelos computacionais investigados, foi possível verificar que:

- não há diferença significativa entre o calor volumétrico armazenado no solo pelos modelos de um duto isolado e de dois dutos isolados;

- em contrapartida, existe diferença significativa entre os valores dos calores volumétricos armazenados pelos modelos de um duto isolado e de um duto com convecção. A menor diferença percentual entre os valores dos calores volumétricos armazenados pelos modelos ocorre quando são utilizados um comprimento de 5 metros e uma distância entre centros de 0,20 m e a maior diferença percentual acontece quando são empregados um comprimento de 20 metros e uma distância entre centros de 0,30 m;

- também há diferença significativa entre os valores dos calores volumétricos armazenados pelos modelos de um duto isolado e de dois dutos com convecção. Neste caso, o modelo de dois dutos com convecção produz resultados percentuais correspondentes, praticamente, à metade daqueles obtidos para o modelo de um duto com convecção;

- não há diferença significativa entre os valores de calor volumétrico armazenado no solo empregando a resolução acoplada das equações da energia e da massa e a resolução da equação da temperatura. Mesmo para os modelos de um e de dois dutos com convecção a diferença percentual é desprezível.

A análise das evoluções da temperatura e do conteúdo de umidade em pontos situados no eixo de simetria vertical de cortes transversais xy efetuados na metade do comprimento dos modelos de um duto isolado e de um duto com convecção, mostrou que:

- para a variação da temperatura do ar na entrada do duto, dada por uma senóide com 14 °C de amplitude, os pontos do corte transversal na metade do comprimento de 5 metros do

modelo de um duto com convecção foram os que apresentaram a maior amplitude da mudança de temperatura, que alcançou 10,00 °C. Esta maior variação da temperatura em relação à obtida para o modelo de um duto isolado, que foi de 8,23 °C, deve-se ao aumento do gradiente de temperatura produzido pela troca convectiva na face norte deste modelo. Nestes pontos a maior amplitude da mudança do conteúdo umidade foi de apenas 0,000366. Esta mudança, que ocorreu no ponto mais próximo do escoamento, representa apenas 0,14 % do valor do conteúdo inicial de umidade;

-comparando os dois resultados precedentes, verifica-se que uma variação da temperatura de até 10,00 °C aplicada em um volume de controle de solo (do tipo aluvião arenoso) produz uma diferença de apenas 0,07 %, para mais ou para menos, do conteúdo inicial de umidade nesse volume. Conseqüentemente, pode-se afirmar que, para uma variação periódica da temperatura do meio ambiente de até 14 °C, não ocorre desenvolvimento de frentes de secagens significativas no solo do corte transversal avaliado;

-para a variação da temperatura do ar na entrada do duto, dada por uma senóide com 50 °C de amplitude, a maior diferença de temperatura apresentada por um dos pontos do corte transversal na metade do comprimento de 5 metros do modelo de um duto com convecção foi de 36,00 °C. Esta diferença produziu uma variação do conteúdo de umidade, no ponto mais próximo do escoamento, de apenas 0,001348, a qual representa 0,54 % do conteúdo de umidade inicial. Isto indica que, mesmo considerando uma situação extrema com variações da temperatura do meio ambiente de até 50 °C não ocorrerá desenvolvimento de frentes de secagens nos pontos do solo situados no corte transversal analisado.

A análise da evolução da temperatura e do conteúdo de umidade, realizada de forma complementar, em três pontos situados ao longo da primeira camada de solo do modelo de um duto isolado com um comprimento de 20 metros, revelou que:

-para a variação da temperatura do ar na entrada do duto de 14 °C, a maior amplitude da diferença de temperatura, de 9,47 °C, ocorreu no ponto situado na entrada do duto. Por sua vez, a menor amplitude da diferença de temperatura, que aconteceu no ponto localizado na saída do duto, alcançou apenas 2,78 °C;

-a maior e a menor diferença de conteúdo de umidade foram, respectivamente, de 0,13 e 0,04 % do valor inicial. Estas pequenas diferenças indicam que não há formação de frentes de secagem ao longo do comprimento do modelo de um duto isolado, que utiliza uma variação da temperatura do ar na entrada do duto de 14 °C.

As variações da temperatura do escoamento em função da distância axial z para os modelos de um duto isolado e de um duto com convecção, mostraram que as formas das curvas de evolução da temperatura dependem do horário em questão, ou seja, se nesse horário o

escoamento fornece ou recebe calor do solo. Assim, quando o escoamento fornece calor ao solo as correspondentes curvas decrescem logaritmicamente. Em contraste, quando o escoamento recebe calor do solo as curvas associadas a estes horários crescem logaritmicamente. Ainda, quando no mesmo horário o escoamento fornece e recebe calor de partes diferentes do duto, a curva decresce para a primeira parte e cresce para a segunda parte do duto e inversamente para a alternativa onde o escoamento recebe e fornece calor a partes distintas do duto.

A análise das evoluções da temperatura no modelo de dois dutos com convecção indica que, quanto maior for a distância entre as entradas de ar nos dutos e o corte transversal xy , maior será a diferença entre as amplitudes das curvas de temperatura correspondentes aos escoamentos de primeiro e do segundo duto. Além disso, é a distância anterior que determina qual fluxo de calor (o correspondente ao escoamento interno ou o associado à troca convectiva com o meio ambiente) é mais intenso em determinados pontos do corte transversal xy .

Os perfis de temperatura, em diferentes horários, obtidos em um corte transversal xy na metade do comprimento dos quatro modelos computacionais investigados mostraram que, durante o dia, o solo absorve calor dos escoamentos internos de ar, visto que neste período a temperatura do solo é menor que a dos escoamentos. Durante a noite, ocorre o contrário, os perfis de temperatura mostram que o solo possui uma temperatura mais elevada, ou seja, neste período os escoamentos de ar dentro dos dutos recebem calor do solo.

Durante o dia, os campos de conteúdo de umidade apresentam migração da umidade nas regiões próximas aos dutos e, conseqüente, acúmulo nas regiões mais afastadas dos dutos. Durante a noite, estes campos apresentam migração da umidade das regiões mais afastadas para as regiões próximas aos dutos, e, desta forma, estas últimas regiões apresentam níveis de conteúdo de umidade superiores ao inicial.

Os campos de temperatura revelaram que a forma quadrada da seção transversal dos domínios computacionais dos diferentes modelos avaliados permite a ocorrência de uma troca de calor mais intensa na parte central de seus lados quando comparados aos cantos. Este efeito da forma quadrada, também, é estendido para os perfis de conteúdo de umidade, que possuem um comportamento inverso em relação ao campo de temperatura, ou seja, as regiões do solo com temperaturas relativas altas possuem conteúdos de umidade menores que os das regiões com temperaturas relativas baixas e vice versa.

Para os horários próximos da troca de sentido do fluxo de calor associado à troca convectiva entre o escoamento e o solo envolvente ao duto, somente os perfis de temperatura correspondentes aos modelos computacionais com convecção apresentam uma faixa de solo com temperatura aproximadamente igual a do escoamento, logo, nessas horas o escoamento não realiza troca térmica com essa faixa de solo.

Como sugestões para futuros trabalhos tem-se:

- resolver o problema considerando também a transferência de calor por radiação e evaporação;
- explorar outras condições de contorno;
- empregar outros tipos de solo;
- resolver o escoamento dentro do duto do modelo computacional;
- estender a metodologia numérica proposta na solução de problemas de linhas de vapor e cabos elétricos de potência aterrados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrams, D. W., Benton, C. C., 1980, “**Simulated and Measured Performance of Earth Cooling Tubes**”, Proceedings of the 5th National Passive Solar Conference, Amherst, Mass., Oct. 19-26.

Baxter, D. O., 1994, “**Energy exchanger and related temperatures of an earth-tube heat exchanger in the cooling mode**”, Transactions of the ASAE, vol. 37, pp. 257-267.

Bernier, H., Raghavan, G. S. V., Paris, J., 1989a, “**Evaluation of a soil heat exchanger-storage system of a greenhouse. Part I: System performance**”, Canadian Agricultural Engineering, vol. 33, pp. 93-98.

Bernier, H., Raghavan, G. S. V., Paris, J., 1989b, “**Evaluation of a soil heat exchanger-storage system of a greenhouse. Part II: Saving aspects**”, Canadian Agricultural Engineering, vol. 33, pp. 93-98.

Bharadwaj, S. S., Bansal, N. K., 1981, “**Temperature Distribution inside Ground for Various Surface Conditions**”, Building and Environment, vol. 16, N° 3, pp. 183-192.

Boulard, T., Baille, A., 1986a, “**Simulation and Analysis of Soil Heat Storage Systems for a Solar Greenhouse. I-Analysis**”, Energy in Agriculture, vol. 5 pp. 175-184.

Boulard, T., Baille, A., 1986b, “**Simulation and Analysis of Soil Heat Storage Systems for a Solar Greenhouse. II-Simulation**”, Energy in Agriculture, vol. 5 pp. 285-293.

Boulard, T., Razafinjohany, E., Baille, A., 1989a, “**Heat and water vapour transfer in a greenhouse with an underground heat storage system. Part I - Experimental Results**”, Agricultural and Forest Meteorology, vol. 45, pp. 175-184.

Boulard, T., Razafinjohany, E., Baille, A., 1989b, “**Heat and water vapour transfer in a greenhouse with an underground heat storage system. Part II - Model**”, Agricultural and Forest Meteorology, vol. 45, pp. 185-194.

Buckingham, E., 1907, “**Studies in the movement of soil moisture**”, U.S. Dept. Agr. Bur. Soils Bull., 38, Washington, pp. 29-61.

Cary, J. W., Taylor, S. A., 1962a, **“The Interaction of the Simultaneous Diffusion of Heat and Water Vapor”**, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 26, pp. 413-416.

Cary, J. W., Taylor, S. A., 1962b, **“Thermally Driven Liquid and Vapour Phase Transfer of Water and Energy Soil”**, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 26, pp. 417-420.

Cary, J. W., 1963, **“Onsager’s Relations and the Nonisothermal Diffusion of Water Vapor”**, J. Phys. Chem., vol. 67, pp. 126-129.

Cary, J. W., 1966, **“Soil Moisture Transport due to Thermal Gradients: Predical Aspects”**, Soil Amer. Proc., vol. 30, pp. 428-433.

Childs, E. C., Collis-George, N., 1950, **“The Permeability of Porous Materials”**, Proc. Roy. Soc., vol. 201A, pp. 392-405.

Chung, M., Jung, P-S., Rangel, R. H., 1999, **“Semi-analytical solution for heat transfer from a buried pipe with convection on the exposed surface”**, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 42, pp. 3771-3786.

Couvillion, R. J., 1981, **“Heat and Mass Transfer in a Semi-Infinite Moist Soil with a Drying Front Present”**, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, School of Mechanical Engineering.

Crausse, P., 1982, **“Étude Fondamentale des Transferts Couplés de Chaleur et d’Humidité en Milieu Poreux non Saturé”**, Thèse d’Etat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

Crausse, P., Bacon, G., Bories, S., 1981, **“Étude Fondamentale des Transferts Couplés Chaleur-Masse en Milieu Poreux”**, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 24, N° 6 , pp. 991-1004.

Cunningham, M. J., 1992, **“Moisture Diffusion due to Periodic Moisture and Temperature boundary Conditions - an Approximate Steady Analytical Solution with Non-Constant Diffusion Coefficients”**, Building and Environment, vol. 27, N° 3, pp. 367-377.

Damasceno Ferreira, L. S., 1987, **“Migração de Umidade Causada por Gradientes Térmicos entre Duas Fronteiras Impermeáveis Contendo um Meio Poroso Não Saturado”**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.

Damasceno Ferreira, L. S., Prata, A. T., 1989, **“Evaluation of a Parametric Model for Heat and Mass Transfer in Unsaturated Porous Media”**, Multi-Phase Transport & Particulate Phenomena, vol. 1, Edited by T. Nejat Veziroglu, Hemisphere Publishing Corporation, New York.

Damasceno Ferreira, L. S., Prata, A. T., 1990, **“Moisture Migration near a Heated Cilinder bounded by a Moist Soil”**, Anais do III Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Itapema, SC, pp. 613-618.

Damasceno Ferreira, L. S., 1993, **“Transferência de Calor e Migração de Umidade em Solos que Envolvem Cabos de Potência Enterrados”**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.

Darcy, H., 1856, **“Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon”**, Dalmont, Paris.

De Vries, D. A., 1958, **“Simultaneous Transfer of Heat and Moisture Transfer in Porous Media”**, Transfer. Am. Geophys. Union, vol. 39, pp. 909-916.

De Vries, D. A., 1963, **“Thermal Properties of Soils”**, Physics of Plant Environment, Van Wijk W. R., ed., North-Holland Publishing Co., Amsterdam.

De Vries, D. A., 1975, **“Heat Transfer in Soils”**, Heat and Mass Transfer in Biosphere, pp. 5-28, Scripta, Washington.

Eckert, E. R. G., Faghri, M., 1980, **“A General Analysis of Moisture Migration Caused by Temperature Difference in an Unsaturated Porous Medium”**, Int. J. Heat and Mass Transfer, vol. 23, pp. 1613-1623.

Eckert, E. R. G., Faghri, M., 1986, **“A Parametric Analysis of Moisture Migration in an Unsaturated Porous Slab Caused by Convective Heat and Mass Transfer”**, Warme-Stoffbertrg., vol. 20, pp. 77-87.

Ewen, J., 1988, **“Thermal Instability in Gently Heated Unsaturated Sand”**, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 31, N°8, pp. 1701-1710.

Ewen, J., 1990, **“Susceptibility to Drying of Unsaturated Soil near Warm Impermeable Surfaces”**, vol. 33, N°2, pp. 359-366.

Freitas, D. S., Prata, A. T., 1996, **“Thermal performance of underground power cables with constant and cyclic currents in presence of moisture migration in the surrounding soil”**, IEEE Transactions on power delivery, vol. 11(3), Usa.

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.

Garrido, C., Otero, A. F., Cidras, J., 2003, **“Theoretical model to calculate steady-state in transient ampacity and temperature in buried cables”**, IEEE Transactions on power delivery, vol. 18(3), Usa.

Gauthier, C., 1994, **“Tranfert de chaleur et d’humidité dans le sol”**, Internal raport, Groupe de recherche THERMAUS. Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke.

Gauthier, C., Lacroix, M., Bernier, H., 1997, **“Numerical Simulation of Soil Heat Exchanger-storage Systems for Greenhouses”**, Solar Energy, vol. 60, N° 6, pp. 333-346.

Haines, W. B., 1930, **“Studies in the Physical Properties of Soils”**, J. Agric. Sci., vol. 20, pp. 97-116.

Hartley, J. G., 1977, **“An Analysis of Thermal Stability of the Soil Environment of Underground Electric Cables”**, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, School of Mechanical Engineering.

Hartley, J. G., 1987, **“Coupled Heat and Mass Moisture Transfer in Soils: A Review”**, Chapter 4 de Advances in Drying, editado por A. S. Mujumdar, Hemisphere, WEashington.

Hartley, J. G., Couvillion, R. J., 1981, **“Drying Front Movement Near Low-Intensity, Impermeable Underground Heat Sources”**, J. Heat Transfer, vol. 108, pp. 182-189.

Hollmuller, P., Lachal, B., 2001, **“Cooling and preheating with buried pipe systems: monitoring, simulation and economic aspects”**, Energy and Buildings, vol. 33, pp. 509-518.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 1996, **“Fundamentos de Transferência de Calor e Massa”**, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. - LTC, 4ª ed., Rio de Janeiro.

Jackson, K. W., 1980, **“Enhancement of Thermal Energy Transport Through Granular Media”**, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.

Janssen, H., Carmeliet, J., Hens, H., 2004, **“The Influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground”**, Building and Environment, vol. 39, pp. 825-836.

Jury, W. A., 1973, **“Simultaneous Transport of Heat and Moisture Through a Medium Sand”**, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin.

Kämpf, A. N., 2000, **“Produção Comercial de Plantas Ornamentais”**, Livraria e Editora Agropecuária Ltda., ISBN 85-85347-44-9, Guaíba, RS.

Kurata, K., Takakura, T., 1991a, **“Underground storage of solar energy for greenhouses heating. I. Analysis of seasonal storage systems by scale and numerical models”**, Transactions of the ASAE, vol. 34, pp. 563-569.

Kurata, K., Takakura, T., 1991a, **“Underground storage of solar energy for greenhouses heating. II. Comparison of seasonal storage systems”**, Transactions of the ASAE, vol. 34, pp. 2181-2186.

Kurpaska, S., Slipek, Z., Bozek, B., Fraczek, J., 2004, **“Simulation of Heat and Moisture Transfer in the Greenhouse Substrate due to a Heating System by Buried Pipes”**, Biosystems Engineering, vol. 90(1), pp. 63-74.

Luikov, A. V., 1954, **“Transport Phenomena in Capillary-porous Bodies”**, Ostekidzdat, Moscou.

Luikov, A. V., Perelman, T. L., Levdansky, V. V., Leitsina, V. G., Pavlyukevich, N. V., 1974, **“Theoretical investigation of vapour transfer through a capillary-porous body”**, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 17, pp. 961-970.

Luikov, A. V., 1975, **“System of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-porous bodies”**, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 18, pp. 1-14.

Maliska, C. R., 1995, **“Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”**, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. - LTC, Rio de Janeiro.

Marczak, L. D. F., Sebben, S., 1998, **“Heat transfer and moisture migration in soils**

surrounding buried power cables”, Latin American Applied Research.

Mavroyanopoulos, G. N., Kyritsis, S., 1986, **“The performance of a greenhouse heated by an earth-air heat exchanger”**, Agricultural and Forest Meteorology, vol. 36, pp. 263-268.

Mendes, N., Winkelmann, F.C., Lamberts, R., Philippi, P. C., Cunha Neto, J. A. B., Pwedrini, A., 1996, **“Cooling Loads from Heat and Moisture Transfer through Porous Walls: Sensitivity to Treatment of Transfer Coefficients in the Philip and De Vries Model”**, VI Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Florianópolis, pp. 155-160.

Mendes, N., 1997, **“Desenvolvimento de Modelos para Código Genérico de Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações”**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.

Mendes, N., Philippi, P. C., Lamberts, R., 2002, **“A new mathematical method to solve highly couple equations of heat and mass transfer in porous media”**, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 45, pp. 509-518.

Mendes, N., Philippi, P. C., 2005, **“A method for predicting heat and moisture transfer through multilayered walls based on temperature and moisture content gradient”**, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp. 37-51.

Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., 1992, **“Modeling the earth temperature using multiyear measurements”**, Energy and Building, vol. 19, pp. 1-9.

Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., 1994, **“Modeling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers”**, Solar Energy, vol. 53, pp. 301-305.

Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., Tselepidaki, I., 1995a, **“Parametric prediction of the buried pipes cooling potencial for passive cooling applications”**, Solar Energy, vol. 55, nº 3, pp. 163-173.

Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., Tselepidaki, I., 1995b, **“On the ground temperature below building”**, Solar Energy, vol. 55, nº 5, pp. 355-362.

Moore, R. E., 1939, **“Water Conduction from Shallow Water Tables”**, Hilgardia, vol. 12, pp. 383-466.

Nasrallah, S. B., Perre, P., 1988, **“Detailed Study of a Model of Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Porous Media”**, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 35, N° 5, pp. 957-967.

Patankar, S. V., 1980, **“Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”**, McGraw-Hill, New York.

Patankar, S. V., 1982, **“A General-Purpose Computer Program for Two-Dimensions Elliptic Simulations”**, Class Notes on Advanced Computation of Heat Transfer and Fluid Flow, University of Minnesota, Winter.

Philip, J. R., De Vries, D. A., 1957, **“Water Movement in Porous Media under Temperature Gradients”**, Trans. Am. Geophys. Union, vol. 29, pp. 222-232.

Puri, V. M., 1986, **“Feasibility and Performance Curves for intermittent Earth Tube Heat Exchangers”**, Am. Soc. Agricult. Eng., vol. 29, pp. 526-532.

Santamouris, M., Balaras, C. A., Dascalaki, E., Vallindras, M., 1994, **“Passive solar agricultural greenhouses: a worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes”**, Solar Energy, vol. 53, n° 5, pp. 411-426.

Santamouris, M., Mihalakakou, G., Balaras, C. A., Argiriou, A., 1995, **“Use of Buried Pipes for Energy Conservation in Cooling of Agricultural Greenhouses”**, Solar Energy, vol. 55, N° 2, pp. 111-124.

Santander, R. E., Bubnovich, V., 2002, **“Assessment of mass and heat transfer mechanisms in unsaturated soil”**, Int. Comm. Heat Mass Transfer, vol. 29, n° 4, pp. 531-848.

Schneider, G. E., 1985, **“An Investigation into the Heat Loss Characteristics of Buried Pipes”**, Transactions of ASME, Technical Notes, vol. 107, pp. 696-699.

Shah, D. J., Ramsey, Y. W., Wang, M., 1984, **“An Experimental Determination of Heat and Mass Transfer Coefficients in Moist, Unsaturated Soils”**, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 27, pp. 1075-1081.

Sibley, K. J., Raghavan, G. S. V., 1984, **“Heat Transfer Coefficients for Air Plastic Corrugated Drainage Tubes”**, Canadian Agricultural Engineering, vol. 26, N° 2, pp. 177-180.

Sodha, M. S., Buddhi, D., Sawhney, R. L., 1991, **“Thermal Performance of Underground Air Pipe: Different Earth Surface Treatments”**, Energy Convers. Mgmt., vol. 31, N° 1, pp. 95-104.

Sodha, M. S., Buddhi, D., Sawhney, R. L., 1993, **“Optimization of Pipe Parameters of Underground Air Pipe Cooling System”**, Energy Convers. Mgmt., vol. 34, N° 6, pp. 465-470.

Sodha, M. S., Mahajan, U., Sawhney, R. L., 1994, **“Thermal performance of a parallel earth air-pipes system”**, Int. Journal of Energy Research, vol. 18, pp. 437-447.

Thomas, H. R., Rees, S. W., Sloper, N. J., 1998, **“Three-Dimensional Heat, Moisture and Air Transfer in Unsaturated Soils”**, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 22, pp. 75-95.

Trombe, A., Serres, L., 1994, **“Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation”**, Energy and Buildings, vol. 21, pp. 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, vol. 18, pp. 35-43.

Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., 1976, **“Fundamentos da Termodinâmica Clássica”**, Editora Edgard Blücher Ltda., 2ª ed., São Paulo.

Whitaker, S., 1977, **“Simultaneous Heat Mass and Momentum Transfer in Porous Media”**, Druing Technology, 1, pp. 3-33.

Xinguo, L., Zhao, J., Zhou, Q., 2005, **“Inner heat source model with heat and moisture transfer in soil around the underground heat exchanger”**, Applied Thermal Engineering, vol. 25, pp. 1565-1577.

APÊNDICE I

MODELO FENOMENOLÓGICO DE PHILIP E DE VRIES

O modelo fenomenológico de Philip e De Vries, 1957, propõe equações governantes para o processo de transporte de calor e massa em meios porosos não-saturados, sendo que nestas equações as influências dos gradientes de temperatura e umidade no transporte de calor e massa aparecem explicitamente. Para obter as equações governantes os autores empregaram nas equações de balanço de massa e energia as leis fenomenológicas da difusão de massa para as fases líquida, Lei de Darcy, e vapor, Lei de Fick, e difusão de calor, Lei de Fourier.

Como a formulação matemática utilizada no presente trabalho é fundamentada no modelo clássico de Philip e De Vries, 1957, para o transporte simultâneo de energia e massa em meios porosos não-saturados, na seqüência são reproduzidas suas principais equações. Primeiramente são apresentadas as principais expressões que compõem a equação governante do transporte de massa. Posteriormente, são expostas as expressões mais importantes que formam a equação governante do transporte de calor.

a) Equação do transporte de massa

A equação governante do transporte de massa é determinada a partir da Lei de Conservação de Massa, considerando negligenciável a massa de vapor d'água presente nos poros, se comparada à massa do líquido:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\vec{j}_v + \vec{j}_l}{\rho_l} \right) \quad (1)$$

onde θ é o conteúdo volumétrico de umidade, t é o tempo, \vec{j}_v é o fluxo de vapor, \vec{j}_l é o fluxo de líquido, ρ_l é a massa específica do líquido. Assim, para encontrar a correspondente equação governante do transporte de massa basta determinar, separadamente, as expressões para os fluxos de vapor e de líquido.

A expressão para o fluxo de vapor \vec{j}_v proposta pelos autores corresponde a uma forma modificada da Lei de Fick para a difusão de vapor d'água no ar, sendo que esta forma inclui os efeitos da dependência da taxa de difusão com a porosidade do meio. Para isso, os

autores introduzem novas variáveis que levam em conta a tortuosidade do meio poroso e a redução de seção de passagem do vapor devido à presença de líquido. Assim, a equação modificada da Lei de Fick é expressa por:

$$\vec{j}_v = -D_{am} \nu \alpha a \vec{\nabla} \rho_v \quad (2)$$

onde D_{am} é a difusividade molecular do vapor d'água no ar, ν é o fator de fluxo de massa, α é o fator de tortuosidade, a é o conteúdo volumétrico de ar, associado à porosidade e ao conteúdo de líquido, e ρ_v é a massa específica do vapor d'água.

Substituindo o valor do gradiente da massa específica do vapor d'água na equação (2) e dividindo a expressão resultante pela massa específica do líquido, chega-se à equação:

$$\frac{\vec{j}_v}{\rho_l} = - \left(D_{TV} \vec{\nabla} T + D_{\theta V} \vec{\nabla} \theta \right) \quad (3)$$

onde D_{TV} é a difusividade térmica do vapor e $D_{\theta V}$ é a difusividade isotérmica do vapor, dadas pelas equações (4) e (5), respectivamente.

$$D_{TV} = \frac{D_{am} \nu \alpha a h}{\rho_l} \frac{d \rho_{sat}}{dT} \quad (4)$$

$$D_{\theta V} = \frac{D_{am} \nu \alpha a \rho_v g}{\rho_l R_v T} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (5)$$

onde h é a umidade relativa para uma mistura gasosa ar-vapor d'água em meios porosos, ρ_{sat} é a massa específica do vapor saturado, g é a aceleração da gravidade, R_v é a constante do vapor d'água e ψ é o potencial de sucção do solo.

Para obter a equação do fluxo de líquido Philip e De Vries utilizam uma expressão da Lei de Darcy modificada por Childs e Collins-George, 1950, de forma a possibilitar sua aplicação a fluxos viscosos em sistemas porosos insaturados; o fluxo de vapor é definido como o produto entre um fator de proporcionalidade e o potencial total de umidade Φ , logo a expressão que define o fluxo de vapor é dada por:

$$\frac{\vec{j}_l}{\rho_l} = -K_{hid} \vec{\nabla} \Phi \quad (6)$$

onde o fator de proporcionalidade da equação anterior K_{hid} é chamado de condutividade hidráulica do meio poroso insaturado.

Substituindo o potencial total de umidade em (6) e realizando operações algébricas, os autores chegam á expressão:

$$\frac{\vec{j}_l}{\rho_l} = -\left(D_{Tl} \vec{\nabla} T + D_{\theta l} \vec{\nabla} \theta + K_{hid} \vec{k} \right) \quad (7)$$

onde \vec{k} é o vetor unitário com direção do eixo dos z , D_{Tl} a difusividade térmica do líquido e $D_{\theta l}$ é a difusividade isotérmica do líquido, sendo que estas duas difusividade são dadas pelas equações (8) e (9), respectivamente.

$$D_{Tl} = K_{hid} \frac{\partial \psi}{\partial T} \quad (8)$$

$$D_{\theta l} = K_{hid} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (9)$$

Substituindo as equações (3) e (7) em (1), obtém-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left(D_{TV} \vec{\nabla} T + D_{\theta V} \vec{\nabla} \theta \right) + \vec{\nabla} \cdot \left(D_{Tl} \vec{\nabla} T + D_{\theta l} \vec{\nabla} \theta \right) + \vec{\nabla} \cdot \left(K_{hid} \vec{k} \right) \quad (10)$$

ou, rearranjando:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left[D_T \vec{\nabla} T + D_\theta \vec{\nabla} \theta \right] + \frac{\partial K_{hid}}{\partial z} \quad (11)$$

onde D_T e D_θ são, respectivamente, as difusividades térmica e isotérmica totais, sendo que elas são definidas por:

$$D_T = D_{Tl} + D_{TV} \quad \text{e} \quad D_\theta = D_{\theta l} + D_{\theta V} \quad (12)$$

Finalmente, vale comentar que a equação (11) apresenta, de forma separada, os gradientes de temperatura e de umidade, sendo esta a grande contribuição do modelo proposto por Philip e De Vries. A equação do transporte de massa (11) sem a parcela correspondente à ação da gravidade, foi usada no presente trabalho.

b) Equação de transporte de calor

A equação de conservação de energia em um meio poroso não-saturado é apresentada por Philip e De Vries, 1957, como sendo:

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left[\lambda \vec{\nabla} T + L D_{\theta v} \vec{\nabla} \theta \right] \quad (13)$$

onde T é a temperatura, C é a capacidade calorífica (ou volumétrica de calor) do solo, que segundo De Vries, 1975, contém uma contribuição ponderada da capacidade calorífica das diversas fases, L é o calor latente de vaporização d'água e λ é a condutividade térmica do meio poroso. Esta condutividade térmica é formada pela soma das condutividades do solo seco, do ar dentro dos poros e do vapor contido neles, sendo que esta última condutividade, ou seja, a condutividade térmica do vapor, λ_v , é dada por:

$$\lambda_v = L D_{atm} v h \frac{d\rho_{sat}}{dT} \quad (14)$$

Hartley, 1987, propõe uma nova expressão para a equação da energia (13), proposta por Philip e De Vries, 1957, sendo que esta nova expressão é dada por:

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left[(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \vec{\nabla} T + \rho_l h_{lv} D_{\theta v} \vec{\nabla} \theta \right] \quad (15)$$

onde k_e é a condutividade térmica efetiva para o caso de não existir fluxo de líquido ou vapor e h_{lv} é a entalpia de vaporização. Ainda, toda a expressão $(k_e + \rho_l h_{lv} D_{TV})$ é chamada de condutividade térmica do meio poroso, a qual inclui as contribuições da difusão térmica e do transporte de energia devido à migração do vapor. A equação da energia dada por (15) foi empregada neste trabalho.

Hartley, 1977 e 1987, Couvillion, 1981, e Hartley e Couvillion, 1986, utilizaram as propriedades difusivas do meio dependentes da temperatura e do conteúdo de umidade para analisar o fenômeno da transferência de calor e massa. Destas quatro publicações, Hartley, 1987, resume as três anteriores, sendo que nesta publicação o autor apresenta as propriedades difusivas do meio de forma similar àquela desenvolvida por Couvillion, 1981. Considerando a importância da utilização de propriedades variáveis nas expressões das difusividades térmica e isotérmica, propostas por Philip e De Vries, 1957, que foram usadas no presente trabalho, na seqüência, são apresentadas novas expressões das difusividades térmicas e isotérmicas segundo Couvillion, 1981 e Hartley, 1987. Assim, a nova expressão da difusividade isotérmica para o fluxo de líquido é dada por:

$$D_{\theta l} = \frac{K_{sat} k_{rl} \rho_l}{\mu_l} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \quad (16)$$

onde K_{sat} é a permeabilidade de saturação do solo, k_{rl} é permeabilidade relativa do líquido, μ_l é a viscosidade dinâmica do líquido e $\phi = g \psi$ é o potencial de umidade do solo.

Para o caso de conteúdos de umidade onde ocorre continuidade de fase líquida, os autores utilizam o mesmo conceito empregado por Philip e De Vries, 1957, que propuseram para o potencial de umidade do solo ϕ um modelo baseado na dependência da tensão superficial, σ , com a temperatura. Assim, a equação da difusividade térmica para o fluxo de líquido é dada por:

$$D_{Tl} = \frac{K_{sat} k_{rl} \rho_l \phi}{\mu_l \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \quad (17)$$

Por outro lado, a nova expressão para a difusividade isotérmica do vapor utilizada pelos autores é dada por:

$$D_{\theta v} = \frac{D_{atm} \alpha (\varepsilon - \theta) v \rho_{sat}}{\rho_l} \frac{h}{R_v T} g \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (18)$$

onde ε representa a porosidade do meio, sendo que D_{atm} é representada por:

$$D_{atm} = 2,56 \times 10^{-5} \left(\frac{P_0}{P} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,88} \quad (19)$$

onde P_0 e T_0 são as pressão e temperatura de referência, respectivamente. Na expressão anterior assume-se que $T_0 = 298,16$ K e que P_0 é igual à pressão do sistema P .

Finalmente, a nova equação para a difusividade térmica do vapor proposta pelos autores é expressa por:

$$D_{TV} = \frac{D_{am} f(\varepsilon, \theta) v \rho_{sat} h}{\rho_l R_v T^2} (h_{lv} - \psi g) \quad (20)$$

onde $f(\varepsilon, \theta)$ é denominada função fator de resistência à difusão, sendo que a expressão da função fator de resistência à difusão empregada é aquela proposta por Couvillion, 1981, que é dada por:

$$f(\varepsilon, \theta) = \begin{cases} \alpha \varepsilon, & \text{se } \theta \leq \theta_{cr} \\ \alpha (\varepsilon - \theta) \left(1 + \frac{\theta}{\varepsilon - \theta_{cr}} \right), & \text{se } \theta > \theta_{cr} \end{cases} \quad (21)$$

onde θ_{cr} é o chamado de conteúdo de umidade crítico, que representa o valor do conteúdo de umidade a partir do qual começa a existir continuidade na fase líquida. No lugar do fator de tortuosidade, α , contido na expressão (21), será utilizado o chamado fator de aumento da difusividade térmica do vapor, ζ , proposto por Philip e De Vries, 1957. A expressão que define o fator de aumento da difusividade térmica do vapor é aquela utilizada por Couvillion, 1981, dada por:

$$\zeta = \frac{1}{\frac{\lambda_{ar}}{\lambda_{sl}} + \frac{\varepsilon - \theta}{1 - C_{\alpha\alpha}}} \quad (22)$$

onde λ_{ar} é a condutividade térmica do ar, λ_{sl} é a condutividade térmica do sólido e $C_{\alpha\alpha}$ é a fração da superfície sólida total do meio que está em contato mútuo partícula-a-partícula. Esta fração é definida por:

$$C_{\alpha\alpha} = \frac{\lambda_{ar} (\lambda_{ss} - \lambda_{sl}) + \lambda_{ss} \varepsilon (\lambda_{sl} - \lambda_{ar})}{\lambda_{ar} (\lambda_{ss} - \lambda_{sl}) + \lambda_{sl} \varepsilon (\lambda_{sl} - \lambda_{ar})} \quad (23)$$

onde λ_{ss} é a condutividade térmica do solo seco.

As novas expressões das difusividades térmica e isotérmica dadas pelas equações (16), (17), (18) e (20), também, foram usadas no presente trabalho.

APÊNDICE II

CONSTANTES E EXPRESSÕES DAS PROPRIEDADES VARIÁVEIS UTILIZADAS NO PRESENTE TRABALHO

a) As constantes utilizadas neste trabalho são:

- Temperatura de referência, $T_0 = 298,16$ [K];
- Constante geral dos gases para o vapor d'água, $R_v = 461,52$ [m²/s² K];
- Constante geral dos gases para o ar, $R_{ar} = 287,06$ [m²/s² K];
- Porosidade, $\varepsilon = 0,517$;
- Fator de tortuosidade, $\alpha = 0,66$;
- Permeabilidade de saturação do solo, $K_{sat} = 2,69 \times 10^{-12}$ [m²];
- Grau de saturação crítica, $S_{cr} = 0,2495$;
- Condutividade térmica do solo seco, $\lambda_{ss} = 0,30$ [W/m K];
- Condutividade térmica do sólido, $\lambda_{st} = 5,85$ [W/m K];
- Capacidade calórica (ou volumétrica de calor) do solo seco, $C_{ss} = 9,7 \times 10^5$ [J/m³ K];

b) As expressões empregadas neste trabalho são:

- Grau de saturação do solo, $S = \theta / \varepsilon$;
- Grau de saturação efetiva do solo, $S_e = (S - S_{cr}) / (1 - S_{cr})$;
- Conteúdo de umidade crítico, $\theta_{cr} = S_{cr} \cdot \varepsilon$;

- Condutividade térmica efetiva:
$$k_e = \frac{\lambda_{ss}}{0,1786 + 0,8214 e^{-1,74224 S + 9,6831 S^2 - 47,7571 S^3}} \quad [\text{W/m.K}]$$

- Potencial de sucção:

$$\frac{\phi}{R_v T_0} = \begin{cases} -7,248 e^{-23,8034 S}, & \text{quando } S < 0,25 \\ -92,135 e^{-112,8126 S + 258,4547 S^2 - 214,4969 S^3}, & \text{quando } 0,25 \leq S \leq 0,40 \\ \frac{-5,425 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{S^{1,3216}} \right) (1-S)^{8,8574}}{\text{tgh}(\pi S)^{4,1717}}, & \text{quando } S > 0,40 \end{cases} \quad [\text{J/kg}]$$

-Permeabilidade relativa:

$$k_{rl} = \begin{cases} 0, & \text{quando } S \leq 0,25 \\ S_e^4 e^{-6,06128 + 2,92738 S_e + 16,0411 S_e^2 - 29,5457 S_e^3 + 16,63855 S_e^4}, & \text{quando } S > 0,25 \end{cases} \quad [\text{m}^2]$$

onde S_e é o grau de saturação efetiva do solo;

-Massa específica do líquido (água):

$$\rho_l = \frac{999,836 + 18,2249T - 7,92221 \times 10^{-3} T^2 - 5,544846 \times 10^{-5} T^3 + 1,497562 \times 10^{-7} T^4 - 3,932952 \times 10^{-10} T^5}{1 + 1,815973 \times 10^{-2} T}$$

-Viscosidade dinâmica do líquido (água): $\mu_l = 1,083 \times 10^{-8} \exp\left(\frac{2635,57}{T} + 8,30853 \times 10^{-3} T\right)$ [Pa s];

-Calor latente de vaporização do vapor d'água:

$$h_{lv} = 4186 \left(755,785 - 0,53883 T - 7,7141 \times 10^{-4} T^2 + 3,48007 \times 10^{-6} T^3 - 4,70563 \times 10^{-9} T^4\right) \quad [\text{J/Kg}];$$

-Massa específica do vapor d'água saturado:

$$\rho_{sat} = \frac{1,39165 \times 10^9}{T} \exp\left(\frac{-5819,36}{T} + 0,013551 T - 5,80 \times 10^{-5} T^2 + 5,722 \times 10^{-8} T^3\right) \quad [\text{Kg/m}^3];$$

-Condutividade térmica do ar: $\lambda_{ar} = 0,00413333 + 7,36 \times 10^{-5} T$ [W/m K];

-Capacidade volumétrica de calor: $C = C_{ss} [1 + 0,002 (T - 298,16) + 0,675]$ [J/m³ K];

-Fator de fluxo de massa: $v = 1 - \left(1 - \frac{R_v}{R_{ar}}\right) \rho_v / (\rho_v + \rho_{ar})$;

-Fator da equação (17) do APÊNDICE I: $\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial T} = -2,05 \times 10^{-3} - 1,7134 \times 10^{-5} (T - 298,16)$

-Umidade relativa: $h = e^{\frac{\phi}{R_v T}}$

As expressões físicas para as propriedades foram retiradas da seguinte referência:

KEENAN, J.H.; KEYES, F.G.; HILL, P.G., MOORE, J.G. (1969), "Steam Tables", John Wiley & Sons, New York.