

Análise de Sistemas Compactos de Arrefecimento por Tubos Enterrados para Edifícios Multifamiliares

Alexandre de Jesus Freire

Relatório do Projecto Final / Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. José Luís Coelho Alexandre



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2008

**Análise de Sistemas Compactos de Arrefecimento por Tubos
Enterrados para Edifícios Multifamiliares**

Alexandre de Jesus Freire

Julho 2008

“Feliz o homem que achou sabedoria e o homem que obtém discernimento, porque tê-la por ganho é melhor do que ter por ganho a prata, e tê-la como produto [é melhor] do que o próprio ouro. Ela é mais preciosa do que os corais, e todos os outros agrados teus não se podem igualar a ela.”

– Provérbios 1:7

RESUMO

As políticas energéticas têm orientado o desenvolvimento tecnológico internacional na área da térmica dos edifícios para construções dotadas de sistemas de climatização de baixo consumo. Este trabalho enquadra-se na aplicação de um dos muitos sistemas passivos existentes, o permutador de tubos enterrados, a edifícios residenciais de elevada ocupação.

Normalmente, neste mercado, as áreas disponíveis para a instalação da tecnologia em estudo são reduzidas, por isso avaliou-se a possibilidade de desenvolver permutadores compactos que satisfizessem as apertadas restrições de espaço e, ao mesmo tempo, apresentasse elevada eficiência.

Foi avaliada a possibilidade de utilizar uma configuração de duas ou três camadas de tubos para reduzir ao atravancamento do sistema, compararam-se os resultados de permutadores com um, dois e três andares e constatou-se que as perdas de potências eram no máximo de 6%.

Para estudar o comportamento do permutador foram analisados os principais parâmetros que intervêm no seu desempenho. O solo foi caracterizado num capítulo separado, o que permitiu uma análise pormenorizada do mesmo. Obteve-se, a nível nacional, um intervalo de valores para as propriedades térmicas do mesmo, a saber, de 3,5 a 8,2 [W/m·K] para a condutibilidade térmica mineral e 760 a 916 [J/kg·K] para a capacidade térmica. Concluiu-se que na maioria dos casos pode, e deve, ser aproveitado o solo nativo excepto na localidades com solo granítico.

Na análise paramétrica também foram estudados outros parâmetros da configuração geométrica do permutador, nomeadamente o diâmetro, comprimento e número de tubos e a profundidade de cada andar. Observou-se ainda que as variáveis de maior importância são as que alteram directamente a velocidade de escoamento, seguidas da profundidade entre camadas de tubos.

Finalmente, o permutador foi integrado num edifício para estudar a evolução dinâmica da temperatura interior dos espaços climatizados. Comprovando que, mesmo com configurações compactas, o permutador pode funcionar como sistema independente de arrefecimento e, em alguns casos, no período de aquecimento, com o apoio de sistemas de climatização convencionais.

ABSTRACT

Energy policies have driven international technology development in the building sector for construction of buildings equipped with low consumption techniques of air conditioning. This work fits in with the application of one of the many existing passive systems, the buried pipes heat exchanger, for residential buildings of high occupancy.

Usually, in this market, the available areas for the installation of the technology under study are low, so it's evaluated the possibility of developing compact heat exchangers to meet the tight restrictions of space while present high efficiency.

It was assessed the possibility of using a configuration of two or three layers to reduce the occupied area by the system, comparing the results of exchanger with one, two and three floors it was found that the loss of power was a maximum of 6%.

For this study it was evaluated the main parameters involved in the performance of the exchanger. The soil was described in a separate chapter, in a national level, that led to a range of values for the thermal properties of the same, namely, from 3.5 to 8.2 [W / m·K] for the mineral and thermal conductivity 760 to 916 [J / kg·K] for the thermal capacity. It was concluded that in most cases, must and should be used the native soil, except for the localities with granitic soil.

In the parametric analysis were also studied other parameters of the geometric configuration of the heat exchanger, including the diameter, length and number of tubes and depth of each layer. It was also observed that the variables of greatest importance are those that directly affect the flow's speed, followed by the length of the soil between layers of tubes.

Finally the buried pipe's system was integrated into a building to study the dynamic evolution of inside temperature of the air conditioned spaces. Verifying that, even with compact configurations, the heat exchanger can operate as independent cooling system and, in some cases, at heating season, with the support of conventional air conditioning systems.

AGRADECIMENTOS

Considero que a elaboração de uma tese de mestrado é um produto colectivo embora a sua redacção e responsabilidade seja predominantemente individual. Várias pessoas contribuíram para que este trabalho chegasse a bom termo. A todas elas registo a minha gratidão.

A Jeová pelas faculdades mentais que me deu e pela capacidade de as usar sabiamente nas verdadeiras prioridades.

Aos meus pais, pela sólida formação dada até ao momento.

Ao Professor José Luís Alexandre a sua disponibilidade irrestrita, sua forma exigente, crítica e criativa de arguir as ideias apresentadas, facilitando o alcance dos objectivos.

À Professora Maria Cristina Vila que me revelou informação relevante para a realização deste trabalho.

À Engenheira Elsa Ramalho, do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) pela informação gentilmente cedida.

A todos os amigos que estiveram privados da minha companhia e que entenderam plenamente o meu esforço e dedicação e este trabalho.

ÍNDICE GERAL

<u>1. INTRODUÇÃO.....</u>	<u>3</u>
1.1. ENQUADRAMENTO INTRODUTÓRIO DO TEMA	3
1.2. EVOLUÇÃO DOS PERMUTADORES DE CALOR AR-TERRA.....	6
1.2.1. PROPRIEDADES TÉRMICAS	8
1.2.2. COMPORTAMENTO DO SOLO	9
1.2.3. MODELAÇÃO	10
1.2.4. PROCESSOS E MÉTODOS.....	11
1.3. PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA.....	12
1.4. OBJECTIVOS.....	13
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	14
<u>2. ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO.....</u>	<u>19</u>
2.1. DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	20
2.2. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO.....	23
2.2.1. CLASSIFICAÇÃO GEOLÓGICO-MINEIRA	23
2.2.2. CLASSIFICAÇÃO FÍSICA.....	28
2.3. MASSA VOLÚMICA	33
2.4. FACTORES EXTERNOS.....	33
2.4.1. COBERTURA DO SOLO.....	33
2.4.2. VELOCIDADE DO VENTO	35
2.4.3. TEMPERATURA AMBIENTE.....	35
2.4.4. HUMIDADE RELATIVA DO AR	36
2.4.5. RADIAÇÃO SOLAR.....	37
<u>3. MODELAÇÃO DO PERMUTADOR AR-TERRA.....</u>	<u>41</u>
3.1. INTRODUÇÃO	41
3.2. MODELO FÍSICO DO PERMUTADOR AR-TERRA	42
3.2.1. NÚMERO DE CAMADAS DO PERMUTADOR.....	45
3.2.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MODELOS MATEMÁTICOS ADOPTADOS.....	46
3.3. SIMPLIFICAÇÕES NA CRIAÇÃO DO MODELO	48

3.4. MODELO ANALÍTICO.....	50
3.5. MODELO DISCRETO	52
3.5.1. GERAÇÃO DA MALHA PARA O CASO MAIS COMPLEXO (3 CAMADAS).....	54
3.5.2. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	58
3.6. POTÊNCIAS E COP/EER	65
3.6.1. POTÊNCIA DO VENTILADOR	65
3.6.2. POTÊNCIA DO PERMUTADOR E COP	67
<u>4. VALIDAÇÃO E ESCOLHA DO MODELO.....</u>	<u>71</u>
4.1. MODELO ANALÍTICO.....	71
4.2. MODELO DISCRETO	74
4.3. SELECÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	76
<u>5. ESTUDO PARAMÉTRICO</u>	<u>81</u>
5.1. CLIMA	82
5.2. TIPO DE SOLO	84
5.3. NÚMERO DE CAMADAS DE TUBOS.....	86
5.4. PROFUNDIDADE E ESPAÇAMENTO ENTRE CAMADAS	87
5.5. DIÂMETRO DOS TUBOS.....	90
5.6. VELOCIDADE DE ESCOAMENTO	93
5.7. COMPRIMENTO.....	94
5.8. NÚMERO DE TUBOS	96
<u>6. INTEGRAÇÃO DO PERMUTADOR NUM CASO PRÁTICO.....</u>	<u>101</u>
6.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO.....	101
6.2. CONTROLO E APOIO DO SISTEMA	104
<u>7. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO CASO DE ESTUDO</u>	<u>109</u>
<u>8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</u>	<u>115</u>
8.1. CONCLUSÕES	115
8.2. TRABALHOS FUTUROS	117

<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>121</u>
--	-------------------

<u>ANEXOS</u>	<u>125</u>
----------------------------	-------------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Configurações de permutadores: a) Série, b) Paralelo, c) Andares, d) Irregular	11
Figura 2- Configurações tubulares dos permutadores de tubos enterrados	12
Figura 3- Constituição básica do solo [29]	20
Figura 4- Alteração do nível freático com acidentes geométricos	21
Figura 5- Fenómenos físicos que intervêm na composição do solo [29]	22
Figura 6- Perfil de horizontes do solo [30]	22
Figura 7- Curva da composição do solo em função do tamanho dos grãos [38]	28
Figura 8- Diagrama triangular das combinações de areia, argila e silte [38]	29
Figura 9- Diagrama triangular da composição básica de vários tipos de solos [15]	32
Figura 10- Evolução da temperatura de solos relvados e térreos [40]	34
Figura 11- Evolução da temperatura segundo o tempo e a profundidade	35
Figura 12- Estrutura do modelo numérico	42
Figura 13- Esquema de um permutador ar-terra típico	43
Figura 14- Soluções adoptadas em casos práticos	43
Figura 15- Permutador ar-terra modelado	44
Figura 16- Esquema do modelo distribuído do permutador compacto	45
Figura 17- Evolução temporal da temperatura ambiente	47
Figura 18- Simplificação na disposição dos tubos enterrados	49
Figura 19- Esquema do modelo analítico	50
Figura 20- Cubo elementar da modelação discreta	53
Figura 21- Malha monodimensional	55
Figura 22- Malha bidimensional	56
Figura 23- Análise paramétrica do número de nós J, M, N	57
Figura 24- Perfil de fluxo de calor para vários N e J	57
Figura 25- Nós da superfície do solo típico de cada fronteira física	60
Figura 26- Nós das paredes laterais	61
Figura 27- Evolução temporal do perfil de calor	62
Figura 28- Perfil de temperaturas: a) Resultados de referência b) Resultado do modelo desenvolvido	72

Figura 29- Perfil de temperaturas: a) Resultados de referência b) Resultado do modelo desenvolvido _____	73
Figura 30- Comparação da temperatura de saída do permutador _____	73
Figura 31- Evolução da temperatura para várias profundidades _____	75
Figura 32- Potência do permutador do modelo de Badescu _____	75
Figura 33- Potência do permutador em funcionamento permanente _____	75
Figura 34- ΔT entre a entrada e a saída do permutador do modelo de Badescu _____	75
Figura 35- Gradiente de temperaturas entre a entrada e a saída do permutador _____	75
Figura 36- Temperatura de saída do permutador permanentemente ligado _____	77
Figura 37- Comparação do modelo monodimensional e bidimensional _____	78
Figura 38- Temperatura ambiente do Porto e Lisboa _____	83
Figura 39- Temperatura de saída do permutador _____	83
Figura 40- Potência do permutador no Porto e Lisboa _____	84
Figura 41- Comparação dos solos de areia e calcário _____	85
Figura 42- Perfil de temperaturas do solo com um permutador de três andares _____	86
Figura 43- Variação da potência média de arrefecimento com a profundidade _____	88
Figura 44- Evolução temporal do perfil de calor para $Y=3$ [m], $E=1,5$ [m] _____	89
Figura 45- Evolução da potência em função do espaçamento entre andares _____	89
Figura 46- Isofluxo de calor em função do tempo e do espaço _____	90
Figura 47- Análise do diâmetro dos tubos em função da potência do permutador _____	92
Figura 48- Efeito na potência devido ao aumento da área de transferência _____	92
Figura 49- Influência da velocidade do escoamento _____	93
Figura 50- Evolução da temperatura e potência com o comprimento do permutador _____	95
Figura 51- Evolução da temperatura e potência com o número de tubos por andar _____	96
Figura 52- Transição de regime do escoamento _____	97
Figura 53- Plano do caso de estudo _____	102
Figura 54- Esquema dos pisos do edifício _____	103
Figura 55- Esquema de integração do permutador com o edifício _____	103
Figura 56- Comparação entre a temperatura ambiente e à saída do permutador permanentemente em Julho _____	105
Figura 57- Período de funcionamento do ventilador _____	106
Figura 58- Potência do permutador ao longo do ano de simulação _____	110
Figura 59- Temperatura exterior e do espaço climatizado _____	111

Figura 60- Ocorrência de temperaturas inferiores às indicadas no período de arrefecimento	111
Figura 61- Frequência de ocorrência de temperaturas inferiores às indicadas no período de aquecimento	112

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I – Quadro de propriedades térmicas das formações geológicas	26
Tabela II – Capacidade térmica das formações geológicas	27
Tabela III- Intervalos máximos da condutibilidade e capacidade térmica	28
Tabela IV- Variação da condutibilidade com a humidade e a porosidade	30
Tabela V- Variabilidade da capacidade térmica com a humidade e a porosidade	31
Tabela VI- Valores adoptados para a simulação	32
Tabela VII- Diâmetro dos tubos PEAD e Grés Vitificado	91
Tabela VIII- Dados de simulação	109
Tabela IX- Dados de simulação	109
Tabela X- Propriedades térmicas da areia recolhidas em vários artigos científicos	129

NOMENCLATURA

Caracteres Romanos

Modelo Analítico

b	Profundidade do tubo enterrado	m
d_h	Diâmetro do tubo	m
erf	Função Erro	
erfc	Função Erro Complementar	
h_c	Coefficiente de convecção à superfície do solo	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
L	Comprimento do tubo	m
$\dot{m}$	Caudal do permutador	kg/s
t	Tempo	s
t^*	Tempo aquando da temperatura diária máxima	s
t^0	Período das flutuações de temperatura	s
t_1	Tempo de entrada em funcionamento do permutador	s
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{T}$	Temperatura média	$^{\circ}\text{C}$
T_G	Temperatura do solo	$^{\circ}\text{C}$
ΔT	Amplitude de temperatura $(T_{\max} - T_{\min})/2$	$^{\circ}\text{C}$
v_{ar}	Velocidade do ar no permutador	m/s
x	Profundidade	m

Modelo Discreto

rug_{tubo}	Rugosidade da superfície interior dos tubos	m
d_{in}	Diâmetro interior do tubo	m
e	Espessura	m
E	Espaçamento entre andares	m
f	Factor de humidade da superfície do solo	
g	Gravidade	m/s^2
h	Entalpia	J/kg
I_{sol}	Radiação incidente do sol	W/m^2
J	Número de nós na direcção vertical das camadas intermédias do solo	

Nomenclatura

k_{local}	Coeficiente de perdas localizadas equivalente da instalação	
Localidade	Localização do sistema	
$\dot{m}$	Caudal do permutador	kg/s
M	Número de nós na direcção horizontal	
N	Número de nós na direcção vertical das camadas extremas do solo	
N_t	Número de Tubos	
$N_{T(1-4)}$	Número de apartamentos do tipo T1, T2, T3 e T4	
$\overline{Nu}$	Nusselt médio para escoamentos internos em secções circulares	
p_{amb}	Pressão atmosférica	Pa
Período _{sim}	Tempo total de simulação	
q	Fluxo de calor interno nos nós	W
Q_{arm}	Calor armazenado no nó	W
Q_{bp}	Potência do permutador	W
Q_{cd}	Calor por condução na superfície do solo	W
Q_{cv}	Calor por convecção	W
Q_{ev}	Calor por evaporação	W
Q_{re}	Calor por radiação emitida	W
Q_{ri}	Calor por radiação incidente	W
sc	Sinal de Controlo do tempo de funcionamento	
Solo	Tipo de solo	
T	Temperatura	°C
v_{amb}	Velocidade do ar exterior	m/s
$\dot{V}$	Caudal volúmico dos apartamentos T1, T2, T3 e T4	m ³ /h
X	Comprimento do Permutador definido pelo utilizador	m
Y	Profundidade do primeiro andar do permutador	m
Z	Largura do permutador	m

Variáveis Comuns ao Modelos e da Fundamentação Teórica

C	Capacidade Térmica	J/kg·K
Solo	Tipo de solo	
p_s	Porosidade do solo	
Pr	Número de Prandtl	
Re	Número de Reynolds	
ΔV	Variação do Volume de Controlo Elementar	m ³
dx, dy e dz	Dimensão Elementar x, y e z; diferencial em x, y e z	m
n_a	Combinações de Ar	

v_s	Combinações de mineral
X	Espaço na direcção x no sistema cartesiano
Y	Espaço na direcção y no sistema cartesiano
Z	Espaço na direcção z no sistema cartesiano

Caracteres Gregos

Modelo Analítico

α	Difusibilidade térmica do solo	m^2/s
τ	Constante de tempo, medida desde o início do ano	s
τ_0	Constante de tempo, medida desde a temperatura mais alta no início do ano	s
ω	Frequência de oscilação da temperatura	rad/s

Modelo Discreto

α_{solo}	Coefficiente de absorção do solo	
α_{ar}	Coefficiente de convecção no interior dos tubos enterrados	$W/m^2 \cdot K$
α_{sup}	Coefficiente de convecção à superfície do solo	$W/m^2 \cdot K$
ϵ_{solo}	Emissividade do solo	
δ	Espaçamento entre nós, comprimento elementar	m
Δt	Intervalo de tempo de simulação	s
σ	Coefficiente de Stefan-Boltzmann, $5,729 \cdot 10^{-8}$	$W/m^2 K^4$
ω	Humidade absoluta	$\frac{kg_{\text{água}}}{kg_{\text{arseco}}}$

Variáveis Comuns ao Modelos e da Fundamentação Teórica

λ	Condutibilidade Térmica	$W/m \cdot K$
μ	Viscosidade dinâmica	$kg/m \cdot s$
ρ	Densidade	kg/m^3
ϕ	Humidade Relativa	

Índices Complementares

Modelo Analítico

a	Ar
d	Valor médio diário
s	Superfície do solo
w	Parede do tubo
y	Valor médio anual

Modelo Discreto

amb	Valor para condições atmosféricas
ar	Valor médio do ar no permutador
i, j	Índices numerados para a geração da malha do solo
in	Valor de entrada no permutador
min	Valor mínimo de referência
nom	Valor em funcionamento normal
out	Valor à saída do permutador
tubo	Valor relativo aos tubos enterrados
T1	Valor para um apartamento T1
T2	Valor para um apartamento T2
T3	Valor para um apartamento T3
T4	Valor para um apartamento T4

Variáveis Comuns ao Modelos e da Fundamentação Teórica

água	Componente de água do solo
ar	Componente de ar do solo
mineral	Componente mineral do solo
solo	Combinação final do solo

Abreviaturas

ADENE	Agência para a Energia
COP	Coeficiente de Performance
EES	Engineering Equation Solver
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
ITE-50	Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NTU	Número de Unidades de Transferência
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
QAI	Qualidade Ar Interior
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios
SW	Sudoeste
TRNSYS	Transient System Simulation
UE	União Europeia

Capítulo 1

Introdução

Enquadramento Introdutório

Evolução dos Permutadores de Calor Ar-Terra

Previsão do Comportamento do Sistema

Objectivos

Estrutura do Trabalho

1. INTRODUÇÃO

Resumo do Capítulo

Este trabalho inicia sua abordagem aos permutadores de tubos enterrados por contextualizar a tecnologia em análise na corrente do tempo e nas necessidades energéticas gerais da sociedade actual. No primeiro capítulo deste documento é apresentada a evolução temporal das principais áreas de trabalho envolvidas no sistema em estudo. Também é descrita a pesquisa bibliográfica realizada sobre o tema, apresentando-se os casos de estudo mais recentes. Este capítulo conclui com uma referência à estrutura e objectivos do trabalho aqui apresentado.

1.1. Enquadramento Introdutório do Tema

O estado actual da sociedade humana impõe um estilo de vida consumista traduzido na crescente demanda de produtos e serviços. No âmbito energético, mais especificamente no sector da climatização, tais necessidades têm sido traduzidas em apertados requisitos de conforto térmico que conduziram, até ao passado recente, a elevados valores de consumo de energia final. Segundo a “Energy Performance of Buildings Directive” – EPBD “o sector dos edificios é alvo prioritário na redução dos consumos energéticos europeus”[1]. Em Portugal, a análise global da distribuição dos consumos energéticos do sector doméstico em termos de energia final [2] é representada pela :

- 50% Confeção de alimentos e aquecimento de águas sanitárias
- 25% Iluminação e electrodomésticos
- 25% Aquecimento e arrefecimento

Por outro lado, a alarmante instabilidade do preço do petróleo tem promovido o vertiginoso aumento do custo da energia. A necessidade de iniciativas capazes de reduzir os consumos energéticos é clara e imperativa!

De notar ainda que “mais de 50% deste consumo pode ser reduzido através de medidas de eficiência energética, o que pode representar uma redução anual de 400 milhões de toneladas de CO₂ – quase a totalidade do compromisso da UE no âmbito do Protocolo de Quioto.” Face a estes dados é evidente que existe um grande potencial para a aplicação de técnicas de eficiência energética, e o sector de habitação e serviços tem grande aceitação para a integração de projectos desta índole.

Introdução

Actualmente, Portugal está a realizar um esforço notório no sentido de controlar os consumos energéticos, sendo que várias acções têm sido tomadas por parte do Estado, entidades públicas e privadas. Entre estas medidas destaca-se o Sistema de Certificação Energética e a revisão da regulamentação quanto ao comportamento térmico dos edifícios (RCCTE) e sistemas energéticos de climatização em edifícios (RSECE) que, num esforço conjunto, têm compelido à redução dos consumos energéticos em edifícios de serviços e residenciais, bem como acentuado o carácter imperativo de criar hábitos de poupança energética na população em geral.

Tais medidas têm resultado na exploração de dois grandes grupos de acção:

- Diversificação da gama de recursos energéticos (fontes renováveis de energia) utilizados
- Melhorar o desempenho energético de edifícios, equipamentos e envolvente

No caso dos edifícios, o desempenho energético está directamente relacionado com a utilização racional da energia, podendo recorrer para tal à concepção de edifícios com preocupações de envolvente, isto é, com menos perdas de calor, melhor comportamento térmico, recorrer a fontes renováveis de energia, e/ou que possam incluir sistemas de climatização do tipo passivos. Em poucas palavras, seguir os princípios envolvidos na arquitectura bioclimática.

Uma das soluções existentes de sistemas passivos consiste no aproveitamento da temperatura do solo e armazenamento térmico para climatizar a temperatura do ar insuflado nos edifícios. Como é do conhecimento geral, o solo possui uma elevada inércia térmica. É devido a esta característica que a sua temperatura se mantém aproximadamente constante ao longo do ano (aproximadamente 15 [°C]) e distante da temperatura ambiente nas estações de aquecimento e arrefecimento. Na estação de aquecimento a temperatura do solo é superior à do ar ambiente e na de arrefecimento inferior, ou seja encontra-se em contraciclo. Por este facto, o solo constitui-se um recurso energético renovável que pode ser aproveitado para a climatização de edifícios. Recorrendo a permutadores de calor pode utilizar-se tal potencial energético do solo. Estes permutadores são conhecidos como permutadores ar-terra, ou ar-solo, e a técnica associada a estes processos é conhecida no sector como “Ground Cooling” ou Tubos Enterrados (“Buried Pipes”).

A implementação dos permutadores em edifícios residenciais e comerciais já é reportada em muitos casos no território norte-americano [3] e europeu, no entanto, continua a ser novidade para muitos países. Na maioria dos casos existentes, os edifícios envolvidos representam a

materialização de projectos de investigação científica que, norma geral, supõe construções com custos acima da média.

Na Europa os esforços em conquistar esta tecnologia de baixo consumo começaram em países com regulamentação sobre consumos energéticos mais estrita, como a Suécia e Alemanha, entre outros. O edifício “Schwerzenbacherhof” [4, 5] é um exemplo de aplicação do sistema de tubos enterrados. Trata-se de um edifício industrial e de gabinetes que possui, nas suas fundações, um permutador ar-terra em circuito aberto que se estende até à área descoberta da construção, localizada no centro de toda a edificação.

A nível nacional a utilização de permutadores ar-terra está apenas nos seus primórdios. O edifício Solar XXI [6] é pioneiro nesta tecnologia, servindo de modelo para a exploração industrial, não só dos permutadores enterrados, como de outras tecnologias amigas do ambiente. Segundo o artigo do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) sobre o edifício Solar XXI o sistema de arrefecimento pelo solo constitui a maior novidade do projecto.

No seguimento de iniciativas como estas, pretende-se tornar este tipo de sistemas viável para aplicações em edifícios residenciais multifamiliares sendo que a gestão das áreas disponíveis para instalar o permutador são um problema preponderante.

A tecnologia a estudar é constituída por um tubo, ou um feixe de tubos, dispostos em uma ou mais camadas, de comprimento L , enterrados a uma determinada profundidade Y . A extremidade inicial está em contacto com o ar exterior, podendo o extremo oposto estar ligado a um sistema de climatização que, por sua vez, alimentará o edifício. Através dos tubos circula ar forçado por um ventilador independente do resto do sistema de climatização. No entanto, o seu controlo é feito de forma integrada com o restante da instalação para que o funcionamento do conjunto esteja harmoniosamente acoplado e se possa obter-se o maior nível de eficiência.

Numa primeira fase da análise dos sistemas de tubos enterrados, há necessidade de se caracterizar o comportamento dos diferentes tipos de solos do ponto de vista térmico. Tal pode ser realizado através de um estudo das propriedades térmicas relacionadas com a forma como o calor se propaga neste. O solo é constituído por uma combinação heterogénea de minerais e matéria orgânica. Sendo assim as propriedades do solo, como combinação final, devem resultar de experimentação específica para tal efeito ou, no seu defeito, de uma abordagem mais grosseira, isto é, média ponderada de valores segundo as características de

Introdução

elementos mais básicos que constituem cada tipo de solo. O mecanismo fundamental para a transferência de calor no solo é a condução. Considerando o solo como um meio sólido estático, os fenómenos de convecção podem ser desprezados. Da mesma forma é desprezada qualquer transferência de massa no solo. Como tal, as propriedades que intervêm na transferência de calor são a condutibilidade térmica, a capacidade térmica e a massa volúmica do solo.

A nível nacional é de interesse avaliar a gama de valores possíveis para a utilização desta tecnologia, bem como as diferentes condições em que os solos se podem encontrar independentemente da sua localização geográfica.

Tendo definido o meio no qual vai funcionar o sistema estudam-se os parâmetros da instalação em função das variáveis de saída do permutador, a saber, potência, temperatura do ar circulado e o Coeficiente de Performance (COP). As características a analisar são a profundidade, disposição, geometria, diâmetros, comprimento, caudais circulados, etc. Este estudo será feito com recurso a modelos numéricos discretos e modelos teóricos simplificados entre os quais se destacam o modelo teórico de Cumuco *et al.* [7], e os modelos numéricos de Viorel Badescu [8] e Bojic *et al.* [9]. Tais estudos apresentam a modelação de sistemas de tubos enterrados e seu comportamento em régimen transiente quer para instantes de tempo específicos como para simulações anuais completas. Adaptações e aplicações destes e de outros modelos serão realizadas para satisfazer as necessidades do programa desenvolvido neste trabalho.

Numa última fase considera-se o funcionamento do sistema num caso específico no Porto, um edifício residencial de alta ocupação. a evolução temporal da temperatura interior dos espaços climatizados é simulada com o permutador de tubos enterrados.

1.2. Evolução dos Permutadores de Calor Ar-Terra

Permutadores de calor são sistemas que permitem a transferência de energia térmica entre fluidos a diferentes temperaturas. Estes aparelhos encontram-se na base da maioria dos processos de transferência de calor e têm sido utilizados em todo tipo de aplicações: militares, industriais, aeroespaciais, informáticas, domésticas, climatização, etc. Nesta última, novamente se observa uma grande variedade de equipamentos que têm como base os permutadores. Variam desde o simples radiador até permutadores extremamente compactos

de baterias de arrefecimento e sistemas em maior escala como o caso dos permutadores ar-terra que são caso de estudo neste documento.

A observação do solo como recurso energético para a climatização passiva tem sido alvo de estudo desde a década de 80. Artigos de imprensa internacional, para o público em geral, têm difundido profusamente sistemas acoplados ao solo como meios de arrefecimento passivo de baixo custo energético. O Departamento de Energia dos Estados Unidos da América iniciou estudos no sentido de quantificar o fluxo de calor trocado entre habitações e o solo, com o objectivo de validar algoritmos que se pudessem dispor ao domínio público em programas de análise térmica como DOE-2 e BLAST. Posteriormente, estudos do Massachusetts Institute of Technology (MIT) e da Universidade de Minnesota (Meixel and Bligh, 1983) deram continuação às actividades do Departamento de Energia, analisando uma variedade de sistemas térmicos ligados ao solo. Durante os anos seguintes, e até os nossos dias, inúmeros estudos relacionados com o aproveitamento e caracterização térmica do solo têm sido efectuados por diferentes investigadores ao redor do mundo. Como é de se esperar de qualquer processo de amadurecimento de uma tecnologia, as áreas de investigação expandiram-se e diversificaram-se para diversos cursos de engenharia, nomeadamente a geotecnia e mecânica.

Actualmente, a utilização de sistemas de climatização, com recurso ao solo, têm tido crescente aceitação quer nos Estados Unidos quer na Europa. A aplicação destes ultrapassa as 550.000 unidades ao redor do mundo, com instalação de mais de 66.000 unidades anualmente sendo que, aproximadamente 80% dos casos se referem a utilizações domésticas [10].

A informação recolhida dos estudos realizados prova que o interesse científico nestas aplicações continua em aumento e ainda revela as áreas de investigação que estão sendo desenvolvidas recentemente. Tais estudos podem ser agrupados de uma forma simplista em 4 grupos:

- Quantificação das propriedades térmicas do solo
- Caracterização do comportamento térmico do solo não perturbado
- Modelação de sistemas de arrefecimento por tubos enterrados
- Análise energética na implementação de sistemas de tubos enterrados em casos de estudo

1.2.1. *Propriedades Térmicas*

As propriedades térmicas do solo – capacidade térmica, condutibilidade e volume específico – têm sido abordadas desde diversas ópticas. Alguns trabalhos, como os realizados pela “*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*” – ASHRAE, têm procurado definir métodos para a medição normalizada “*in situ*” de tais propriedades com vista a obter dados tão próximos quanto possível da realidade do local onde será aplicada o sistema passivo [11],[12]. Os métodos de medição, nos primórdios da tecnologia, eram tipicamente demorados. Contudo, tais técnicas evoluíram de forma notória, sendo actualmente mais simples, rápidas e igualmente exactas.

Outros investigadores porém apresentam uma grande variedade de minerais, caracterizados segundo as propriedades acima salientadas, para aplicações em engenharia [13, 14]. Todavia, torna-se relevante salientar que a interligação de conhecimentos adquiridos entre as várias disciplinas tem sido, até anos recentes, parcialmente interrompida devido à falta de terminologia universalizada que permita identificar as propriedades e características em estudo tanto por agrónomos como por geotécnicos e mecânicos. Mesmo assim, destacam-se alguns autores que investigaram a influência do teor de água e ar nas propriedades do solo bem como a sua variabilidade com tais factores [15, 16]. A componente orgânica da camada mais superficial do solo também tem sido objecto de estudos científicos [17] considerando tanto as propriedades térmicas características da matéria orgânica como a sua influência nas propriedades do solo em geral.

O estudo das propriedades térmicas do solo carece de uma base de dados completa que permita definir facilmente as características dos diversos tipos de solos. Os múltiplos artigos pesquisados não permitem construir uma lista completa de identificação das propriedades necessárias para um determinado solo, primariamente porque estes não coincidem com os minerais estudados mas antes, com combinações específicas destes, e ainda porque os próprios minerais em estudo não abrangem todos os utilizados nas formações geológicas. Assim sendo, não existe a nível nacional nenhum artigo que apresente um mapeamento térmico do solo quanto às suas propriedades. O estudo que mais se assemelha a tal é um artigo publicado por Elsa Ramalho e António Correia, numa parceria entre o INETI e o Departamento de Física da Universidade de Évora [18], que classifica o solo nacional segundo 4 patamares de fluxo de calor que vão desde os 65 mW/m² até os 86 mW/m².

1.2.2. Comportamento do Solo

A determinação do comportamento térmico do solo está intimamente ligada à técnica de arrefecimento por tubos enterrados. Durante o processo evolutivo desta tecnologia foram publicados artigos importantes para a compreensão do comportamento do solo. Tais procuraram traduzir matematicamente os fenómenos físicos que governam o solo visando o estabelecimento de um modelo base capaz de ser utilizado em aplicações futuras de engenharia. Os parágrafos seguintes mencionam os vários trabalhos de destaque encontrados na pesquisa bibliográfica.

Inicialmente, a caracterização do perfil de temperaturas foi descrito através de séries trigonométricas cujos coeficientes foram sendo ajustados para descrever, com maior exactidão, o comportamento real do solo. Um dos estudos mais citados neste caso era o de Fluker (1958), cujos resultados provavam ser os que melhor se adaptavam ao território norte-americano, onde inicialmente se desenvolveu o “ground cooling”. Desde então, muitos artigos têm sido escritos sobre modelos computacionais que recorrem aos elementos finitos para estudar a transferência de calor no solo. Comparou-se a precisão de modelos de elementos finitos com a de modelos de diferenças finitas e, embora os elementos finitos se revelem como sendo os mais precisos concluiu-se, na altura, que a dificuldade de formulação e carga computacional destes não compensa face aos resultados das diferenças finitas. No entanto, este modelo constitui-se como campo de investigação e avaliação de novas técnicas matemáticas e computacionais para a resolução de problemas de condução transiente como é o caso do arrefecimento por tubos enterrados. Em anos recentes, foram desenvolvidos modelos que combinam a utilização de séries trigonométricas com métodos discretos. Recorrendo às séries para aproximar as flutuações da temperatura do ar ambiente e à discretização da equação da condução para a propagação da temperatura na direcção da profundidade, estudos de M. Santamouris e G. Mihalakakou têm definido o balanço térmico à superfície do solo e as componentes de tal balanço para poder predizer o perfil de temperaturas do solo ao longo do tempo [19] bem como os possíveis resultados face à cobertura da superfície. Desde o ano 1996, os resultados destes estudos têm servido de base à publicação de muitos artigos sobre os permutadores ar-terra. Estudos estes que incluem o balanço à superfície do solo para a quantificação, ao longo do tempo, da capacidade do permutador.

1.2.3. Modelação

Em 1954, Ingersoll realizou uma análise teórica dos permutadores de calor. Os seus resultados foram publicados no livro de sua autoria “Heat Conduction, with Engineering, Geological and Other Applications”. Este serviu de base para muitos estudos subsequentes, Akridge, entre outros, fizeram simplificações do modelo teórico para poder facilitar a realização de análises paramétricas, contudo sem abrir mão do rigor necessário para avaliar os sistemas de tubos enterrados. Autores têm acrescido a esta tecnologia equações dos fenómenos da transferência de calor envolvidos, que servem de suporte para os modelos actuais. Mostrel e Givoni (1982) publicaram a equação do coeficiente de convecção à superfície do solo, Penmam (1963) definiu uma expressão para a transferência evaporativa de calor latente que relaciona a temperatura e humidade do ar com a temperatura do solo e ainda outros têm aprimorado a série de Fourier que aproxima a evolução da temperatura da superfície do solo.

O desenvolvimento de modelos para permutadores ar-terra tem convergido em dois grupos básicos, modelos discretos ou modelos analíticos. A vertente com maior aceitação tem sido a dos modelos discretos pois são tipicamente de elaboração mais expedita. Este tipo de formulação descreve os permutadores como um fenómeno de condução monodimensional instacionária [9]. Os autores consideram a direcção dominante do fluxo de calor na vertical, considerando as trocas de calor na direcção horizontal transversal aos tubos desprezáveis face às anteriores. O elo entre os topos dos tubos é unicamente a transferência de massa do ar que circula no interior destes. Outros investigadores, como Viorel Badescu (2006) decidiram simular a condução no solo na direcção do eixo dos tubos e desenvolveram modelos de condução bidimensional [8, 20, 21]. Por outra parte, já foram publicados artigos que abordam o problema com uma análise teórica do comportamento dos tubos enterrados [7, 22]. Nestes casos o comportamento do solo é ditado por uma série de Fourier e a condução é monodimensional. Abrangem ainda outros pormenores técnicos do sistema como o problema da condensação e a integração aos sistemas convencionais em casos de estudo.

Além da modelação do próprio sistema, outros estudos têm sido publicados recentemente sobre a optimização e rendimento do sistema [17, 23], as capacidades máximas [24, 25], e análises económicas [9, 26]. Várias técnicas foram utilizadas para abordar os tópicos acima. M. Santamouris avaliou, em 1995, o potencial deste tipo de permutador com funções de transferência que traduzem o coeficiente de transferência de calor global do sistema, enquanto Jens Pfafferott, em 2003, aplicou métodos standardizados (NTU – Número de Unidades de Transferência) para calcular a eficiência do permutador.

1.2.4. *Processos e Métodos*

Desde o início dos estudos científicos descritos no tópico anterior, diversas configurações de permutadores enterrados têm sido desenvolvidas [27]. Mas para facilitar a compreensão do estado da tecnologia estas podem ser agrupadas em dois tipos de sistemas:

- Sistemas Fechados
- Sistemas Abertos

Nos sistemas fechados, o permutador funciona em circuito com um fluido de serviço intermédio que se encarregará de fazer o transporte de energia para arrefecer ou aquecer o ambiente desejado. O seu funcionamento é em todo semelhante ao de uma bomba de calor cuja fonte fria ou quente, caso seja arrefecimento ou aquecimento, é o solo. Estes sistemas variam muito na configuração do próprio permutador de calor. Como é típico de uma tecnologia “verde” (em termos de desenvolvimento) ainda não existe uma configuração típica para a qual tendam a maioria das soluções, sendo assim os sistemas desenvolvidos recentemente têm as seguintes configurações:

- Verticais
- Horizontais
- Em série
- Em paralelo
- Em andares
- Irregular (“Slinky”)

Na Figura 1 podem observar-se as configurações mencionadas acima.

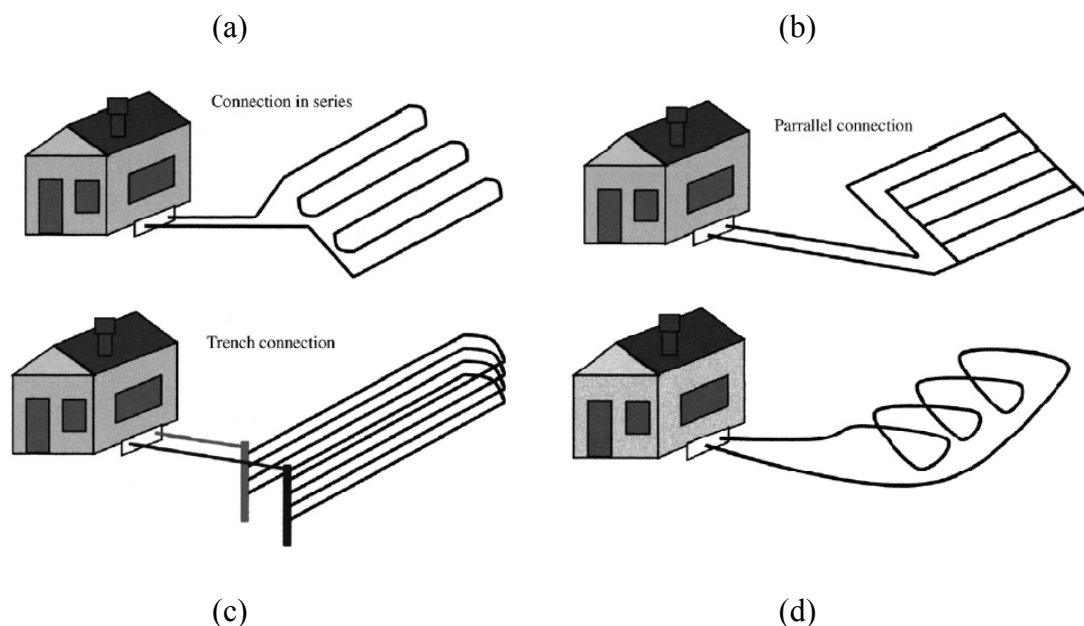


Figura 1- Configurações de permutadores: a) Série, b) Paralelo, c) Andares, d) Irregular

Introdução

Existem também combinações dos formatos acima discriminados que se adaptam a situações específicas. Alguns dos modelos são mais apropriados para grandes profundidades (50 – 150 [m]), uma vez que recorrem a fontes geotérmicas ou a águas subterrâneas, enquanto outros são indicados para baixas profundidades. As formas das secções tubulares também variam de caso para caso existindo as apresentadas na Figura 2.

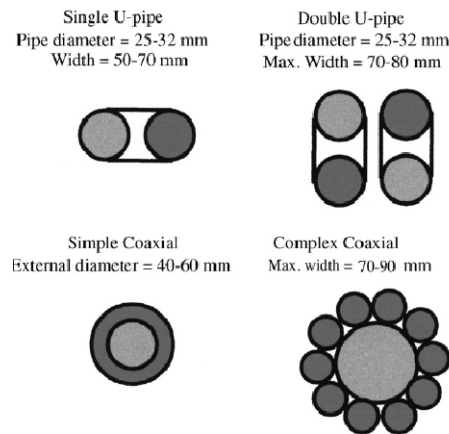


Figura 2- Configurações tubulares dos permutadores de tubos enterrados

Os sistemas abertos, ou directos, são por sua vez permutadores de calor em que o fluido de trabalho circula no permutador sem fazer nenhum circuito fechado independente e é injectado directamente no espaço a climatizar. Assim sendo, o único fluido possível é o ar que é tomado directamente do exterior ou recirculado do próprio ambiente interior. Estes permutadores são constituídos por um tubo, uma serpentina ou um feixe de tubos paralelos dispostos horizontalmente nas fundações ou em espaços adjacentes da edificação.

Todos os tipos de permutadores até agora mencionados podem funcionar como sistema de climatização principal e independente ou como apoio de um sistema convencional de caldeira e chiller, tudo depende do potencial do permutador face às condições do projecto.

Neste trabalho será estudada apenas uma das vertentes acima mencionadas, os permutadores ar-terra de circuito aberto.

1.3. Previsão do Comportamento do Sistema

Os artigos e estudos realizados sobre os permutadores ar-terra mencionados no conteúdo bibliográfico oferecem um panorama do funcionamento do sistema, permitindo desde já prever os possíveis resultados face uma análise paramétrica.

Das bases da transferência de calor, espera-se que tubos de menor diâmetro sejam mais eficientes do que tubos com diâmetro maior visto que, a quantidade de ar que efectivamente entra em contacto com a parede do tubo é maior nos de menor diâmetro. Assim, embora tubos maiores consigam transferir mais energia é preferível utilizar um feixe de tubos de diâmetros pequenos do que um único tubo com diâmetro equivalente.

O ar, devido à sua baixa capacidade térmica, deve atingir a temperatura do solo relativamente rápido pelo que, tubos muito compridos são desnecessários. Em consequência disso os sistemas de tubos em paralelo são preferíveis às associações em série.

Como nos sistemas Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) tradicionais existe a recirculação de ar para evitar consumos de energia excessivos e melhorar a resposta do sistema, espera-se que no caso dos permutadores ar-terra, os sistemas em circuito fechado sejam mais eficientes que os de circuito aberto, isto porque o ar recirculado está mais próximo das condições de conforto que o ar exterior. As proporções de ar novo e ar recirculado seriam, neste caso, reguladas principalmente pela QAI – Qualidade do Ar Interior.

Os tubos devem ser instalados tão profundamente quanto possível pois, com o aumento da profundidade, os efeitos das trocas de calor à superfície dissipam-se, obtendo-se um recurso praticamente constante ao longo do ano e cuja temperatura é mais baixa que o ar exterior no verão e mais alta no inverno.

A performance do sistema depende dos períodos de utilização: ciclos de trabalhos mais prolongados resultarão numa degradação mais acelerada da capacidade térmica do solo. Por outro lado, está intimamente ligado às propriedades do sistema, pelo que se espera que solos arenosos (que possuem as melhores características) sejam a melhor solução.

1.4. Objectivos

A implementação de sistemas de arrefecimento por tubos enterrados tem sido amplamente explorada em aplicações de edifícios de serviços com grandes disponibilidades de terreno para a instalação dos permutadores. Com o crescente desenvolvimento das zonas urbanas o espaço disponível tem deixado de ser uma variável em aberto e passado a tomar o cariz de uma restrição preponderante no projecto de permutadores de tubos enterrados.

O trabalho reportado neste documento tem por objectivo ampliar as aplicações desta tecnologia para edifícios residenciais, em zonas rurais e urbanas, nos quais os espaços de

Introdução

instalação são usualmente restritivos. Pretende analisar a viabilidade de permutadores compactos que possam cobrir os requisitos térmicos deste tipo de edifícios com o menor desperdício possível de áreas de instalação.

Para alcançar este objectivo certas metas a curto prazo têm de ser atingidas paulatinamente, a saber:

- Caracterização do comportamento térmico do solo.
- Determinação da configuração do permutador de forma a ser mais compacta do que as soluções já existentes.
- Escolha do método de simulação mais adequado para o problema.
- Optimização do permutador combinando os efeitos de seus parâmetros mais importantes.

Pretende-se ainda, com este trabalho, fazer uma integração harmoniosa da tecnologia em estudo com edifícios multi-familiares de forma a estudar a evolução temporal das condições de conforto dos espaços climatizados.

1.5. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho sobre sistemas compactos de arrefecimento por tubos enterrados encontra-se organizado em oito capítulos estruturais e anexos.

Começando com o capítulo actual, Capítulo 1, apresenta-se um enquadramento geral do sistema a estudar, explicando a motivação que leva a abordar o tipo de tecnologia em estudo. Realiza-se uma pesquisa bibliográfica sobre as diferentes áreas de investigação implicadas nos tubos enterrados e são apresentados os objectivos do trabalho.

O Capítulo 2 oferece uma descrição completa do principal elemento dos permutadores de tubos enterrados, o solo. Aqui são definidas as características tanto internas como externas ao solo que intervêm no cálculo das propriedades e do comportamento térmico do mesmo.

O Capítulo 3 descreve a constituição geométrica e os princípios físicos de funcionamento de um permutador ar-terra. Destacando-se as configurações mais frequentes bem como as alterações estudadas neste trabalho. Consideram-se ainda, os modelos matemáticos existentes para descrever o problema, nomeadamente modelo analítico monodimensional e modelos discretos mono e bidimensionais. São enumeradas as vantagens e desvantagens da utilização de cada um destes modelos.

No Capítulo 4 são validados os modelos descritos nos capítulos anteriores, nomeadamente, o modelo analítico monodimensional e o modelos discretos mono e bidimensionais.

O Capítulo 5 aborda a análise paramétrica feita para os principais parâmetros do permutador, proporcionando noções sobre os valores óptimos de cada parâmetro.

O Capítulo 6 apresenta o edifício onde vai ser implementado o permutador de tubos enterrados. Menciona as características gerais e as necessidades impostas pelo mesmo. Também se faz uma breve consideração do controlo ao qual o permutador está sujeito.

O Capítulo 7 estuda o efeito da implementação do permutador de tubos enterrados no comportamento térmico de um edifício tendo em conta as lições aprendidas no capítulo anterior.

Finalmente, o Capítulo 8 conclui este documento apresentado as conclusões gerais de todo o trabalho realizado até esse ponto e indicando quais são os alvos para trabalhos futuros na continuação deste tema.

Os Anexos contêm a informação adicional que complementa as explicações dadas no percurso deste relatório.

Capítulo 2

Estudo do Comportamento Térmico do Solo

Definição e Caracterização do Solo

Classificação do Solo

Massa Volúmica

Factores Externos

2. ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO

Resumo do Capítulo

Este capítulo oferece uma descrição completa do principal elemento dos permutadores de tubos enterrados, o solo. Aqui são definidas as características tanto internas como externas ao solo que intervêm no cálculo das propriedades térmicas do mesmo.

A classificação mineral do solo é abordada a nível nacional e considerada como base para o cálculo da condutibilidade e capacidade térmica. Ainda é estudado o efeito da porosidade e humidade do solo, bem como de outros factores externos que influenciam a evolução temporal da temperatura.

A caracterização do regime térmico do solo depende tanto da localização do solo (uma vez que reflecte as condições do clima sob o qual ocorre) como do tipo de solo a que diz respeito [28]. Ambos os parâmetros são altamente variáveis, sendo que os tipos de solo podem variar dentro do mesmo distrito, assim como as características climáticas; no entanto, os dois factores apresentam valores limites que serão alvo do estudo realizado neste capítulo. Sendo assim é importante dedicar particular atenção ao estudo do solo que, como foi mencionado, concentra-se em dois grandes grupos:

- Tipo de solo
- Factores externos

A identificação dos tipos de solos depende de uma série de grandezas básicas que caracterizam as suas propriedades físicas. Estas, por sua vez, determinam o comportamento das propriedades térmicas do solo que neste estudo se resumem à massa específica (ρ), condutibilidade térmica (λ) e capacidade térmica (C). A composição mineral da crosta terrestre constitui um ponto de partida na caracterização térmica pretendida, porque primeiro é uma característica que se pode admitir constante no tempo (suas variações dão-se na ordem do tempo geológico, milhares de anos), e segundo, porque as propriedades térmicas do solo oscilam em torno dos valores dos minerais que constitui cada tipo de terreno e variam segundo as propriedades físicas que os controlam. Desta combinação de factores resultam valores limites que são indicativos do intervalo de valores que as propriedades térmicas em questão podem adoptar no território nacional.

A influência dos factores externos ao solo, tais como as condições climáticas, traduz-se nos fluxos energéticos ocorridos à superfície do mesmo. Tal como no grupo anterior, os dados climáticos dependem de um conjunto considerável de parâmetros que foram explicados e aplicados no decorrer deste trabalho. Algumas simplificações são admitidas para que a complexidade do problema não se estenda além do necessário para os alvos do projecto, sendo explicadas na secção correspondente.

Como se pode notar, o comportamento térmico do solo implica a consideração de uma quantidade elevada de variáveis. Para que a participação destas possa ser percebida são analisadas individualmente e numa sequência lógica de trabalho. Numa primeira fase os tipos de solos existentes são estudados segundo uma classificação geológico-mineira, uma vez identificados os minerais constituintes quantificam-se as respectivas propriedades térmicas. Seguidamente relacionam-se as características da composição física do solo com tais propriedades térmicas e finalmente, volta-se a atenção para os factores externos influentes.

2.1. Definição e Caracterização do Solo

Por solo entende-se o “conjunto natural de partículas minerais que podem ser separadas por agitação na água; os vazios entre as partículas contêm água e ar, separada ou conjuntamente” – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Esta definição transmite, à partida, a ideia do solo ser um material multifásico em que a fase sólida é formada por elementos orgânicos e minerais, a líquida por água e a gasosa por ar.

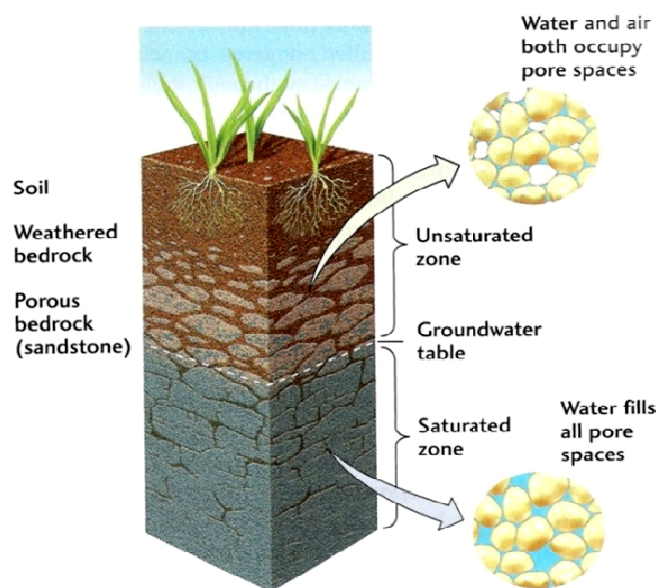


Figura 3- Constituição básica do solo [29]

De uma forma geral, as proporções em que os constituintes acima mencionados se encontram distribuídos está evidenciada na Figura 3, onde se constata que os minerais ocupam cerca de 50% do solo, estando os restantes 50 % repartidos, de forma muito variável, entre água e ar.

O nível de água no solo é um parâmetro que intervém, de forma determinante, no conteúdo dos poros, pois a percentagem de água neles aumenta à medida que se aproximam do nível freático. Abaixo deste, os poros encontram-se ocupados a 100% por água, em tal caso diz-se que o solo está saturado. Tal nível de água é também variável no tempo e no espaço e altamente influenciado pelas condições climáticas [29]. O seu comportamento temporal é caracteristicamente cíclico diminuindo de profundidade na época de chuva, no inverno, e aumentando na época seca, no verão. A profundidade média anual do nível freático não se mantém constante ao longo de todo o território. No caso nacional, também varia segundo os acidentes geográficos existentes: depressões e elevações montanhosas, entre outros, que fazem com que o nível freático fique até mesmo à superfície, ou a grandes profundidades. As próprias edificações feitas no terreno podem alterar o andamento da camada limite de água. Visto que a água não pode atravessar a construção esta vê-se obrigada a contornar o acidente alterando seu nível da forma é esquematizada na Figura 4. No entanto, para efeitos da simulação do sistema térmico o nível freático encontra-se sempre abaixo da profundidade limite de simulação, assim a humidade do solo é homogénea em toda a extensão do mesmo e, ainda, constante no tempo. Tal condição pode ser muito próxima da realidade se o solo for impermeabilizado com uma camada de argila.



Figura 4- Alteração do nível freático com acidentes geométricos

Estudo do Comportamento Térmico do Solo

A matéria orgânica, assinalada na Figura 5, pode existir em elevadas concentrações. Esta varia com a profundidade, sendo bastante elevada nas camadas mais superficiais da crosta terrestre. Tal facto é expectável visto que a actividade vegetal se desenvolve nos primeiros centímetros de solo e prolonga-se até, sensivelmente, 1 metro de profundidade. As características deste componente dependem da actividade biológica que se desenvolve em cada terreno e dos fenómenos atmosféricos da localidade. No entanto, do ponto de vista térmico não diferem substancialmente do meio mineral. Para efeitos deste trabalho, a intervenção da matéria orgânica é desconsiderada e é assumido como um meio homogéneo e isotrópico até a superfície. Caso estas simplificações não sejam consideradas o solo deveria ser discretizado conforme as camadas apresentadas na Figura 6 e, em vez de propriedades constantes no espaço, deveria ser gerada uma matriz que representasse a distribuição espacial de cada propriedade interveniente no processo de cálculo. O estudo das implicações das condições referidas pode ser proposto como trabalho futuro.

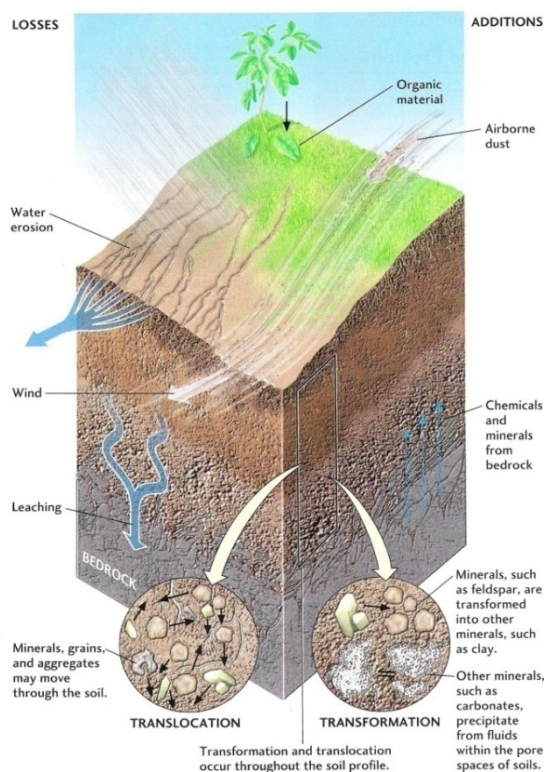


Figura 5- Fenómenos físicos que intervêm na composição do solo [29]

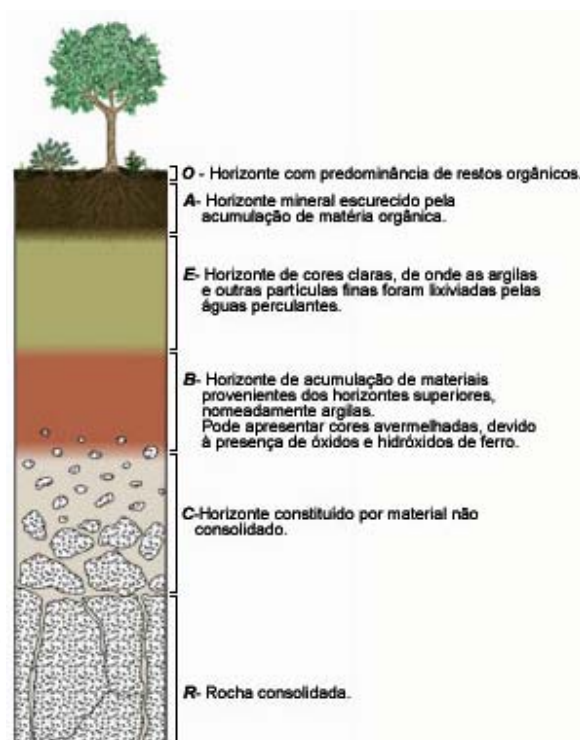


Figura 6- Perfil de horizontes do solo [30]

O solo é composto ainda por uma sobreposição de camadas com formações diferentes, que são denominadas por horizontes terrestres. Existem seis horizontes terrestres bem definidos, com características diferentes, na crosta terrestre e que se representam na Figura 6. Podem ser

agrupados os horizontes “A” e “O” com uma forte componente de matéria orgânica, “E” e “B” com características de deposição das camadas superiores e decomposições da rocha mãe e os horizontes “C” e “R” constituídos tipicamente pela rocha mãe. A tecnologia em estudo desenvolve-se em profundidades pertencentes ao horizonte “E”. As camadas “O” e “A” representam apenas uma pequena porção do recurso utilizado, justificando deste modo a simplificação antes adoptada do solo como meio homogéneo e isotrópico.

Tendo definido o solo em função das características relevantes para os permutadores de tubos enterrados é necessário a classificação e quantificação do recurso.

2.2. Classificação do Solo

Uma correcta determinação das propriedades térmicas do solo passa por uma classificação quanto à origem mineral que pretende discriminar a natureza dos constituintes. Como é de esperar, cada mineral possui um comportamento próprio e que é imposto ao respectivo solo. Por exemplo, um solo cujo principal mineral é o quartzo deve comportar-se, do ponto de vista térmico, de maneira semelhante ao quartzo, sendo minimizadas as variações causadas pelos outros constituintes do solo. Posteriormente, o solo é classificado quanto às propriedades físicas que podem criar tais variações ou desvios. A influência que a água, o ar e a matéria orgânica têm no comportamento térmico do solo é calculada com recurso ao teor em água existente, ao peso volúmico do solo e do mineral, bem como a outras propriedades que são habitualmente utilizadas na mecânica dos solos.

2.2.1. Classificação Geológico-Mineira

A origem dos solos resulta da metamorfose da rocha mãe devido às variações de pressão e temperatura ao longo do tempo, da decomposição e desintegração da rocha e/ou da cristalização e vulcanização. Rochas de origem magmática sujeitas a agentes erosivos podem desintegrar-se e formar solos, ao passo que por efeito das elevadas pressões podem compactar e formar rochas sedimentares. Se as condições de temperatura forem suficientemente elevadas estas podem ainda fundir-se com outros minerais e formar rochas metamórficas. Este processo de conversão tende a ser cíclico e distribui as formações rochosas ao longo da superfície.

Estudo do Comportamento Térmico do Solo

Como resultado, hoje existe uma vasta gama de combinações de minerais distribuídos geologicamente ao longo da crosta terrestre. A nível nacional podemos encontrar formações geológicas diversas, as quais têm sido pormenorizadas por inúmeros estudos geológicos e cartografadas em cartas nacionais. No entanto, não querendo desviar o objectivo deste estudo, limitamos a classificação do solo português a seis grupos base de formações rochosas predominantes, indicadas pelo Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho. Para tal recorreu-se à carta geológica de Portugal, retirada do Atlas de Portugal [31], e que se apresenta no Anexo 1. Neste apresentam-se os seis grupos de formações geológicas que irão ser consideradas no presente documento. É importante discriminar de forma individual os tipos de rochas ocorrentes em Portugal e segundo a geológica carta existem, as seguintes formações:

- | | |
|-------------|-----------------------|
| - Areia | - Xistos |
| - Argila | - Mármore |
| - Arenitos | - Quartzito |
| - Marga | - Gneisses |
| - Calcários | - Mica xistos |
| - Granitos | - Xistos Metamórficos |

As combinações descritas na legenda da carta geológica acima citada são classificadas por letras desde “A” a “F” segundo a ordem em que nela aparecem.

- Grupo A – Areias
- Grupo B – Argilas, arenitos, conglomerados
- Grupo C – Calcários, margas, arenitos
- Grupo D – Granitos
- Grupo E – Xistos, mármore, quartzitos
- Grupo F – Gneisses, micaxistos, xistos metamórficos

Cada formação geológica possui uma determinada composição mineral que, na maioria dos casos, se baseia no minério dominante. A composição pode ter características únicas bem como aspectos em comum entre os vários solos. A caracterização feita neste trabalho recorre principalmente ao dicionário de termos geológicos do INETI – *GEOLEX* – [32] e ao livro “*Understanding Earth*” [29]. Estas referências só fornecem dados geológicos, não faz qualquer menção às propriedades térmicas. Na realidade, ao passo que existem muitos estudos relativos à composição do solo, as propriedades térmicas de seus componentes não têm sido muito estudadas, existindo poucos registos sobre condutibilidade e/ou capacidade térmica de rochas e minerais. Desta forma, para efectuar um estudo cuidado, foram utilizados os resultados de Clauser e Huenges [13] para a condutibilidade térmica, os dados de Schärli e Rybach [14] para a capacidade térmica das rochas, e para a massa específica os dados do livro “*Physical and Chemical Hidrogeology*” [33], também serviram de referência outras enciclopédias de propriedades térmicas [34, 35]. Todas as correspondências atribuídas estão suportadas nos princípios de classificação geológica do solo descritos nos livros base de geologia [29, 33, 36, 37]. Nos casos em que não existe informação sobre um determinado mineral são utilizados os valores de outros minerais semelhantes, ou que pertencem aos mesmos grupos geológicos e como tal são os mais aptos, face às circunstâncias, para aproximar o comportamento térmico dos minerais procurados.

As formações rochosas em que assenta o trabalho, e pelas razões já apresentadas, são as seguintes:

- | | |
|---|----------------------------------|
| - Areia “ <i>Sand</i> ” | - Granitos “ <i>Granit</i> ” |
| - Argila “ <i>Clay</i> ” | - Xistos “ <i>Schists</i> ” |
| - Arenitos “ <i>Sandstone</i> ” | - Mármore “ <i>Marble</i> ” |
| - Conglomerados “ <i>Conglomerate</i> ” | - Quartzito “ <i>Quartzite</i> ” |
| - Calcários “ <i>Limestone</i> ” | - Gnaisse “ <i>Gneiss</i> ” |
| - Marga “ <i>Marl</i> ” | |

No Anexo A encontra-se, com mais detalhe, a informação de todos os constituintes de solo mencionados.

Os resultados obtidos para a condutibilidade e capacidade térmica encontram-se resumidos nas Tabelas I e II onde são discriminados os valores de todos os minérios que compõem os tipos de solos. No caso de existir uma gama de valores para um determinado mineral é assumida uma média como sendo a condutibilidade ou capacidade térmica, conforme o caso, desse mineral. Quando existe mais do que um mineral por elemento as propriedades em questão são função da composição mineral. O mesmo critério é aplicado nos grupos de formações geológicas obtidos pela carta geológica.

Tabela I – Quadro de propriedades térmicas das formações geológicas

Grupo	Elemento	Mineral	Condutibilidade Mineral [W/m·K]		Condutibilidade Elemento [W/m·K]	Condutibilidade Grupo [W/m·K]
A	Areias	Quartzo	6,15	10,17	8,16	8,2
B	Argilas	Andalusite	6,56		6,56	6,6
	Arenitos	Quartzo	6,15	10,17	8,16	
	Conglomerados	---	5,06		5,06	
C	Calcários	Calcite	3,16		3,16	5,1
	Margas	Calcite	3,16		3,97	
		Dolomite	4,78			
	Arenitos	Quartzo	6,15	10,17	8,16	
D	Granitos	Quartzo	6,15	10,17	4,12	4,1
		Orthoclase (Feldspato Potássio)	2,30	2,68		
		Biotite	3,14			
		Muscovite	3,89			
		Anfíbola (hornblende)	2,91			
E	Xistos	Muscovite	3,89		3,02	5,0
		Biotite	3,14			
		Microcline	2,04			
	Mármore	Calcite	3,63	4,00	3,82	
	Quartzitos	Quartzo	6,15	10,17	8,16	
F	Gneisses	Orthoclase (Feldspato Potássio)	2,30	2,68	4,03	3,5
		Albite	2,34			
		Quartzo	6,15	10,17		
		Biotite	3,14			
	Micaxistos	Muscovite	3,89		3,02	
		Biotite	3,14			
		Microcline	2,04			

No caso da capacidade térmica, não foi necessário calcular o valor desta propriedade para os elementos à partir dos minerais componentes, visto que já existiam dados sobre cada elemento, foi utilizada uma correspondência directa do trabalho de Clauser [13]. No entanto, as propriedades dos grupos são calculadas seguindo o mesmo critério utilizado para o caso da condutibilidade térmica. Na tabela abaixo estão assinaladas as equivalências atribuídas para cada elemento.

Tabela II – Capacidade térmica das formações geológicas

Grupo	Elemento	Equivalência	Capacidade Térmica Elemento [J/kg·K]		Capacidade Térmica Grupo [J/kg·K]
A	Areias	Sandstone	700	819	760
	Argilas	Silty mudstone	798	831	785
B	Arenitos	Sandstone	700	819	
	Conglomerados	Conglomerate	764	796	
	Calcários	Talcstone	827		
C	Margas	Marble ¹	809		789
	Arenitos	Sandstone	700	819	
D	Granitos	Granit	720		720
E	Xistos	Serpentine	915	916	
	Mármore	Marble	804		831
	Quartzitos	Sandstone	700	819	
F	Gneisses	---	---	---	916
	Micaxistos	Serpentine	915	916	

O principal mineral existente no solo é o quartzo uma vez que se encontra presente na maioria das formações geológicas. Este mineral possui o maior valor de condutibilidade térmica embora não aconteça o mesmo com a capacidade térmica. Mesmo assim, os solos com um elevado teor de quartzo serão os mais aconselhados para a aplicação de tubos enterrados. De uma forma geral, deseja-se que o solo tenha uma condutibilidade tão alta quanto possível para que possa dissipar o calor que nele é injectado, bem como uma elevada capacidade de armazenamento, permitindo que o calor da época de arrefecimento seja utilizado na de aquecimento, isto de uma forma ideal. A análise efectuada permite concluir, à partida, que os solos arenosos ou argilosos (dos grupos “A” e “B”) são os melhores para o funcionamento desejado.

As tabelas apresentadas também mostram que os grupos “C” – “F” possuem condutibilidades consideravelmente inferiores às do grupo A. Dependendo das necessidades do projecto pode ser interessante “criar o solo à medida” para a instalação dos tubos enterrados, isto é,

¹ A composição base é semelhante à do mármore, por isso utiliza-se uma variação das propriedades deste.

Ver Anexo B

preencher o terreno até certa profundidade, com areia ou outro tipo de solo do grupo “F”, para tornar as condições de projecto mais favoráveis. Na análise paramétrica será objecto de estudo a hipótese de se fabricar o terreno onde os tubos serão implementados para tirar partido de alguns minerais mais propícios a este fenómeno de transferência de calor.

De uma forma geral, a condutibilidade e a capacidade térmica podem então oscilar dentro dos seguintes intervalos apresentados na Tabela III.

Tabela III- Intervalos máximos da condutibilidade e capacidade térmica

Condutibilidade térmica mineral	Capacidade térmica mineral
[W/m·K]	[J/kg·K]
$3,5 < \lambda < 8,2$	$760 < C < 916$

2.2.2. Classificação Física

A componente mineral dos solos é formada por uma aglomeração de grãos de diferentes tamanhos, estes definem quatro grupos bases de solos: argilas, areias, siltes e cascalhos. Por sua vez as areias, siltes e cascalhos subdividem-se em finos, médios e grossos. A quantificação deste parâmetro é realizada por via experimental juntamente com a medição de outras propriedades que sejam necessárias para o requerente e constituem, neste trabalho, dados de entrada para o programa de simulação do permutador ar-terra.

Os gráficos de curvas granulométricas permitem obter uma ideia aproximada da constituição do solo devido ao tamanho dos grãos que o compõem.

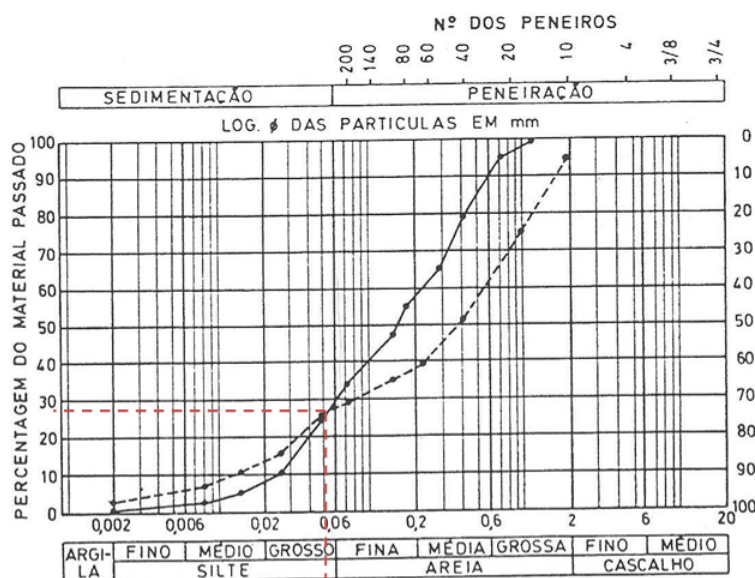


Figura 7- Curva da composição do solo em função do tamanho dos grãos [38]

A Figura 7 apresenta um exemplo de um solo composto por 70 % de areia e 30 % de silte pelo que sua denominação convencional será “areia siltosa”.

Para facilitar a classificação das combinações de minerais é comum utilizar diagramas triangulares que dão, segundo as proporções, a identificação da composição ou os valores da mesma. A Figura 8 mostra precisamente a definição dada para o exemplo antes mencionado.

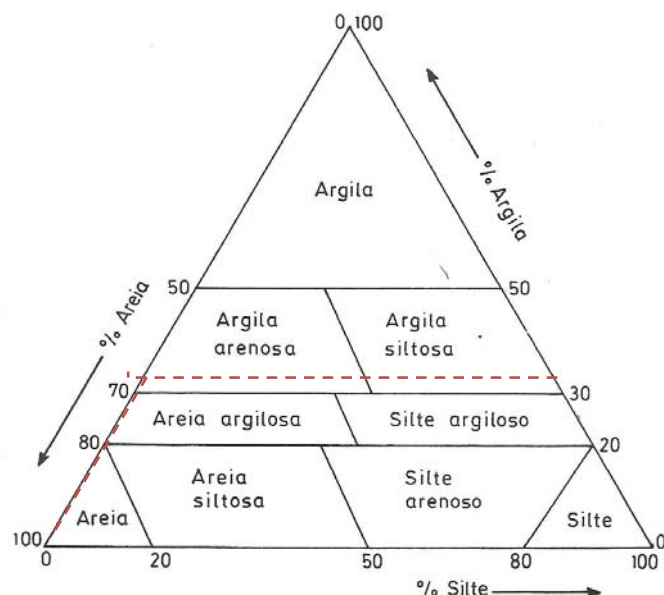


Figura 8- Diagrama triangular das combinações de areia, argila e silte [38]

A forma como as partículas do solo se agrupam é completamente aleatória e está intimamente relacionada com o tamanho dos grãos. Daí a importância da análise granulométrica, pois encaminha o estudo para a definição de outros parâmetros como a porosidade (p_s). As várias configurações das partículas criam no solo espaços que, não estando ocupados por matéria sólida, podem conter outros componentes como água, ar ou ambos. A razão entre o volume ocupado pelo ar e a água e o volume total do solo permite definir a porosidade.

O conhecimento deste parâmetro, ou dos resultados do mesmo, é de elevada importância no cálculo da condutibilidade térmica do solo. Solos bastante compactos tendem a comportar-se como o mineral predominante nele, enquanto solos com p_s elevado podem comportar-se como a água ou o ar conforme o caso, isto é, terão condutibilidades baixas caso o solo esteja seco e condutibilidades elevadas caso seja um solo saturado (poros com 100% de água).

A porosidade é o termo de ponderação para o cálculo das propriedades térmicas dos minerais com as dos elementos que ocupam os espaços vazios. As expressões (1) a (4) apresentam a relação entre as propriedades do solo, a porosidade e as propriedades dos minerais.

$$\lambda_{solo} = \lambda_{mineral} \cdot (1 - p_s) + \lambda_{poros} \cdot p_s \quad (1)$$

$$C_{solo} = C_{mineral} \cdot (1 - p_s) + C_{poros} \cdot p_s \quad (2)$$

Tendo em conta que os poros são ocupados por água, ar ou ambos, as propriedades dos mesmos são calculadas de forma semelhante às do solo, desta vez relacionadas por mais um parâmetro físico que é a humidade relativa – “ ϕ_{solo} ”. As equações para o cálculo da C_{solo} e da λ_{solo} são finalmente apresentadas da forma:

$$\lambda_{solo} = \lambda_{mineral} \cdot (1 - p_s) + [\lambda_{água} \cdot \phi_{solo} + \lambda_{ar} \cdot (1 - \phi_{solo})] \cdot p_s \quad (3)$$

$$C_{solo} = C_{mineral} \cdot (1 - p_s) + [C_{água} \cdot \phi_{solo} + C_{ar} \cdot (1 - \phi_{solo})] \cdot p_s \quad (4)$$

Como já foi referido, a humidade do solo não é uma característica que dependa unicamente deste recurso. Esta encontra-se intimamente relacionada com as características meteorológicas do local, mais especificamente com as taxas e frequências de precipitação local pois nas alturas em que há chuva o solo fica saturado e, dependendo da velocidade de exfiltração da água, este estado prolonga-se no tempo. Se existir uma camada impermeável de forma a reter a água no solo, a humidade deste mantém-se quase constante no tempo. Em termos práticos a humidade pode estabilizar acrescentando, de forma controlada, água ao terreno, em que as quantidades de líquido a injectar podem ser calculadas com estudos de permeabilidade.

Em capítulos seguintes também será considerada, em várias situações, a influência e viabilidade de se manter um solo saturado face a uma instalação que não contemple tal controlo.

As Tabelas IV e V apresentam o efeito da variação da densidade nas propriedades térmicas do solo [39].

Tabela IV- Variação da condutibilidade com a humidade e a porosidade

Condutibilidade λ [W/m·K]		Humidade ϕ_{solo}			
		10%	30%	55%	70%
Porosidade	10%	5,94	5,95	5,97	5,98
	30%	4,64	4,67	4,71	4,74
	60%	2,69	2,75	2,83	2,88
	90%	0,73	0,83	0,96	1,03

Tabela V- Variabilidade da capacidade térmica com a humidade e a porosidade

Capacidade Térmica		Humidade			
C	[J/kg·K]	ϕ_{solo}			
		10%	30%	55%	70%
Porosidade	10%	815	879	958	1006
	30%	928	1119	1357	1500
	60%	1097	1478	1955	2241
	90%	1265	1838	2553	2982

Os valores apresentados, que exibem variações significativas em função da porosidade e humidade, referem-se a um tipo de solo do grupo B que, por defeito, possui uma condutibilidade elevada. Para solos pouco porosos, as propriedades aproximam-se dos valores do minério; no entanto, à medida que a humidade e a porosidade aumentam a condutibilidade decresce rapidamente enquanto a capacidade térmica aumenta.

A humidade tem pouca influência na condutibilidade visto que a λ_{ar} e $\lambda_{água}$ são muito próximas. O que realmente faz diminuir a condutibilidade do mineral é a porosidade. Neste caso, a água e/ou o ar passam a ter um peso considerável. Sendo assim, um solo compacto é o ideal para poder dissipar o calor o mais rapidamente possível.

Já no caso do calor específico, solos com bastante humidade têm a vantagem de aumentar, em muito, a capacidade com relação ao mineral. A humidade neste caso tem um papel fundamental visto que a capacidade térmica da água é quatro vezes superior à do ar. Como a Tabela V também revela, porosidades elevadas permitem aumentar ainda mais a capacidade de armazenamento de energia. No entanto, tal aumento é feito à custa da diminuição da condutibilidade, por isso a solução óptima, do ponto de vista das propriedades térmicas, corresponda a um solo compacto e saturado.

No sentido de suportar as considerações anteriores, com valores experimentais e resultados de medições “*in situ*” efectuou-se um levantamento de informação nesta área. Assim, encontram-se valores para os solos mais frequentes (areias e argilas), mesmo Nidal Abu, *et al.* [16] e Tyson, *et al.* [15] apresentam resultados experimentais que coincidem com a análise feita e a Figura 9 mostra um resumo do estudo efectuado para combinações de ar (n_a), água (θ) e vários minerais (v_s).

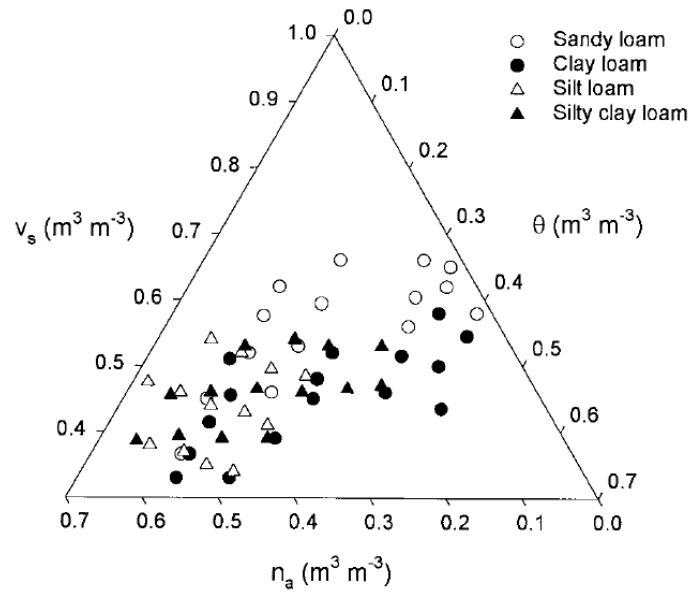


Figura 9- Diagrama triangular da composição básica de vários tipos de solos [15]

Com base nas considerações anteriormente efectuadas, foram calculadas tanto a condutibilidade como a capacidade térmica para solos com uma porosidade de 40% e uma humidade de 50%. Na Tabela VI são resumidos os valores adoptados para a componente mineral bem como os valores finais de cada tipo de solo estudado.

Tabela VI- Valores adoptados para a simulação

Solo	C_{mineral}	λ_{mineral}	C_{solo}	λ_{solo}
Areia	759,5	8,6	1170	5,3
Arenito	759,5	7,34	1170	5,3
Argila	814,5	6,56	1653	4,1
Conglomerado	780	5,18	1633	3,2
Calcário	827	3,16	1661	2
Marga	809	2,8	1650	1,8
Granito	720	5,12	1597	3,2
Xisto	915,5	3,02	1714	1,9
Mármore	804	3,48	1647	2,2
Quartzito	800	8,16	1645	5
Gnaise	800	4,03	1645	2,6

2.3. Massa Volúmica

Apesar da grande variabilidade dos minerais existentes no solo, as formações rochosas que eles compõem acabam por ter massas específicas muito próximas umas das outras. Valores observados em bibliografia de mecânica das rochas confirmam tal facto, onde se observa que ρ varia de 2,55 a 2,94 [kg/m³] [38]. A massa volúmica pode ser assumida constante para qualquer tipo de solo.

Como foi visto no início deste capítulo o solo é composto, em termos simples, por ar e água além da matéria mineral sólida. No entanto, outros factores alheios à composição do solo também influenciam seu comportamento térmico, tais são estudados seguidamente.

2.4. Factores Externos

Consideram-se como factores externos aqueles que não intervêm directamente na composição do solo nem nas suas propriedades intrínsecas, mas que normalmente exercem sua influência na superfície do terreno. No âmbito deste projecto são considerados os seguintes factores externos:

- Cobertura do solo
- Velocidade do vento
- Temperatura ambiente
- Humidade relativa do ar
- Radiação solar

Podem existir outros factores como a precipitação que afectam a humidade do solo, mas na análise efectuada tal parâmetro não foi considerado.

2.4.1. Cobertura do Solo

A cobertura do solo refere-se ao tipo de superfície que este apresenta. Neste trabalho são consideradas duas hipóteses: solo relvado, coberto em toda sua extensão por uma relva curta, e solo descoberto, isto é, com terra à vista, sem nenhum tipo de vegetação.

Estudo do Comportamento Térmico do Solo

A forma do solo reagir à acção da radiação solar bem como as trocas de calor latente entre a superfície e o ar ambiente vê-se afectada pelo tipo de cobertura que possui. Um solo relvado resulta numa redução da amplitude anual da temperatura à superfície sendo que no verão este encontrar-se-á mais frio do que um solo térreo. A Figura 10 é uma análise destes dois casos e claramente pode observar-se que as temperaturas máximas atingidas ocorrem nos solos descobertos.

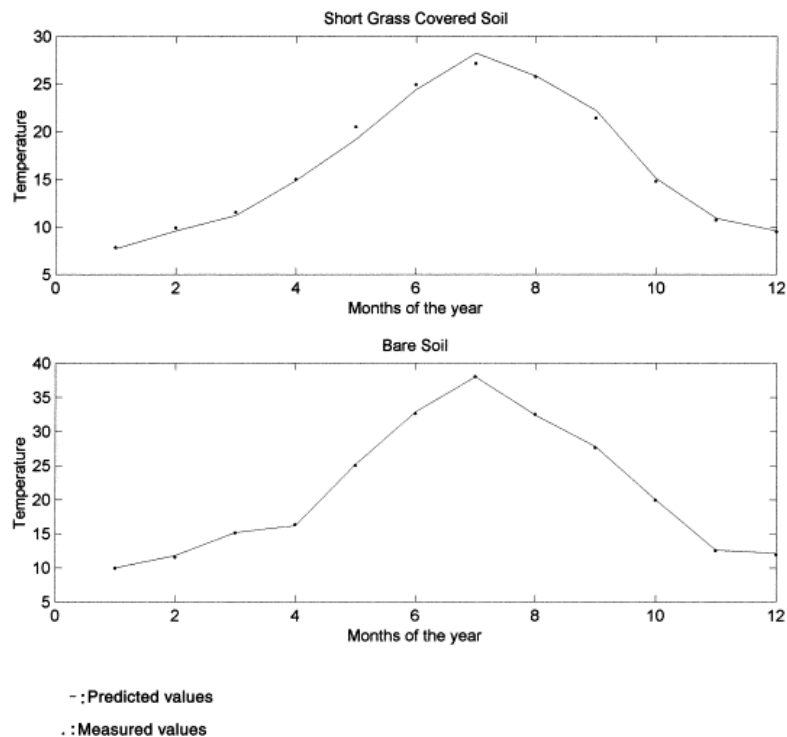


Figura 10- Evolução da temperatura de solos relvados e térreos [40]

O coeficiente de absorção da relva é um dos responsáveis para este resultado, impedindo que a radiação solar seja absorvida com tanta intensidade como no caso do solo descoberto, por outro lado, a relva representa uma protecção contra as trocas de calor evaporativas. Santamouris, *et al.* [19] apresenta a relva como sendo um factor de correcção que reduz as trocas de calor por evaporação com o solo.

Na análise do permutador de tubos enterrados são consideradas as duas situações de cobertura, uma de um solo com o factor de correcção da relva e coeficiente de absorção baixo, e outra nas condições opostas, ou seja, sem vegetação.

2.4.2. Velocidade do Vento

Este parâmetro é uma variável no cálculo do coeficiente de convecção à superfície (α_{sup}) que por sua vez influencia os fluxos de calor convectivo e evaporativo. A utilização de sistemas de arrefecimento por tubos enterrados pode destinar-se tanto a zonas urbanas como a zonas rurais para edifícios de pequena e média envergadura. Dependendo do caso, a velocidade do vento tem diferentes intervalos, para zonas urbanas oscila dentro dos 4 a 5 [m/s], já nas zonas rurais a rugosidade do terreno é menor pelo que o intervalo contempla valores superiores. Na análise efectuada a velocidade do vento é considerada no modelo de simulação.

2.4.3. Temperatura Ambiente

A temperatura exterior é um factor determinante no comportamento do sistema. Os seus efeitos notam-se ao longo da profundidade do solo, como se pode observar na Figura 11 domina por completo a temperatura da superfície do solo e, devido a inércia deste, à medida que a profundidade aumenta os efeitos da temperatura ambiente vão diminuindo e atrasando-se no tempo até que o solo atinge, numa profundidade determinada, uma temperatura aproximadamente constante, em que a variação anual é quase nula (1 [°C] ou menos).

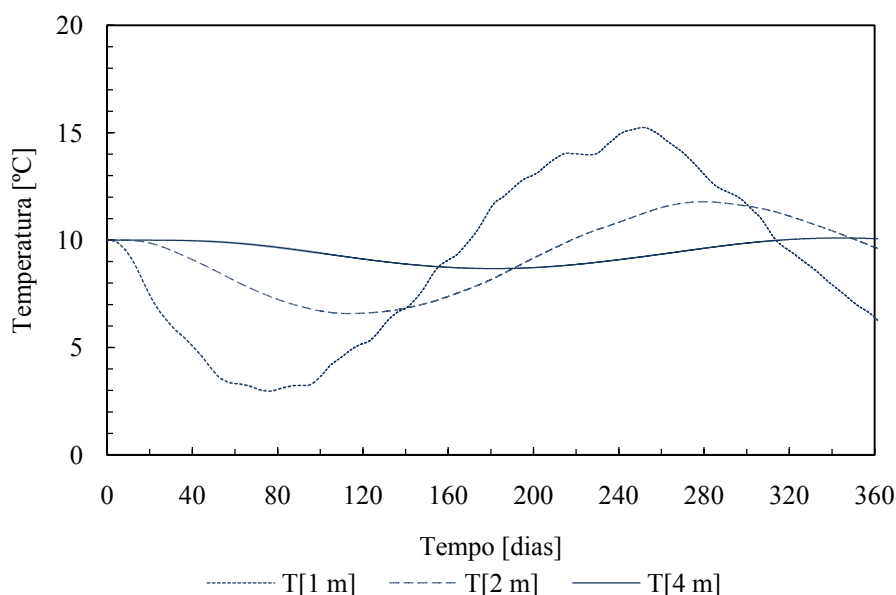


Figura 11- Evolução da temperatura segundo o tempo e a profundidade

Do ponto de vista térmico o solo pode ser classificado segundo sua profundidade em 3 zonas [41].

1. Superfície: até 1 [m]. Pouca inércia, o que implica grandes variações de temperatura em espaços de tempo curtos.
2. Baixa profundidade: 1 a 8 [m]. Temperatura quase constante no tempo, mas tendo ainda uma variação sazonal com um atraso considerável relativamente à temperatura ambiente.
3. Alta profundidade: 8 a 20 [m]. A temperatura é praticamente constante e independente do ambiente, e representa um aumento de temperatura de aproximadamente 1 [°C] por cada 10 [m] de profundidade.

De acordo com a classificação apresentada, a aplicação do sistema de tubos enterrado será implementada nos limiares da zona de baixa profundidade.

As diferenças que existem entre a temperatura do ar e do solo devem-se às condições específicas sob as quais está a ser implementado o sistema de arrefecimento. Por vezes, zonas com muita insolação fazem o solo atingir temperaturas superiores às do ambiente, enquanto terrenos muito húmidos e ventilados tendem a ter superfícies mais frias que o ambiente.

O comportamento da temperatura ambiente é cíclico, tendo frequências diárias e anuais e oscila com uma amplitude anual fixa, enquanto a amplitude diária é variável. No caso da construção do modelo numérico esta condição de fronteira (perfil de temperaturas do solo) pode ser reproduzida por duas vias: ou se dispõe de dados experimentais sobre as condições climáticas da localidade, o que implica um programa com maior peso, mas ao mesmo tempo mais exacto (visto que os dados são resultados de medição directa), ou se aplica a transformada de Fourier para aproximar a flutuação das condições climáticas numa série trigonométrica. No programa de simulação construiu-se uma base de dados para três zonas do país, Porto, Lisboa e Faro com recurso aos dados experimentais contidos no METEONORM [42].

2.4.4. Humidade Relativa do Ar

A humidade relativa do ar varia unicamente com as trocas de calor latente. Quanto maior for o diferencial de humidade entre o solo e o ar ambiente maior será a intensidade do fluxo de calor. A expressão (5) permite determinar os fluxos associados ao calor latente à superfície do solo.

$$Q_{ev} = -0,0168f \cdot A \cdot \alpha_{sup}(103 \cdot T_{solo} + 609 - \phi_{ar} \cdot (103 \cdot T_{amb} + 609)) \quad (5)$$

Em que,

ϕ_{ar} – Humidade relativa do ar [-]

T_{solo}, T_{amb} – Temperatura da superfície do solo e temperatura ambiente [K]

A – Área de transferência de calor, superfície do solo [m²]

α_{sup} – Coeficiente de transferência de calor [W/m²K]

2.4.5. Radiação Solar

A radiação solar considerada para efeitos deste trabalho foi a radiação total (directa mais difusa) incidente numa superfície horizontal. Felizmente, este é o valor típico apresentado pelas bases de dados meteorológicas pelo que, não é necessário aplicar nenhuma conversão para acoplar os dados às condições do problema.

A sua influência no solo depende da intensidade da radiação e do tempo de insolação. É de esperar que solos com maior intensidade e tempo de insolação atinjam temperaturas mais elevadas. De um modo geral, as zonas escolhidas (Porto, Lisboa e Faro) possuem valores de insolação bastante diferentes pelo que são bons casos de estudo para avaliar a influência desta variável.

Capítulo 3

Modelação do Permutador Ar-Terra

Introdução

Modelo Físico do Permutador Ar-Terra

Vantagens e Desvantagens dos Modelos Matemáticos

Simplificações

Modelo Analítico

Modelo Discreto

Potências e COP/EER

3. MODELAÇÃO DO PERMUTADOR AR-TERRA

Resumo do Capítulo

O capítulo apresentado descreve a constituição geométrica e os princípios físicos de funcionamento de um permutador ar-terra. Destacando-se as configurações mais frequentes bem como as alterações estudadas neste trabalho. Consideram-se ainda, os modelos matemáticos existentes para descrever o problema, nomeadamente modelo analítico monodimensional e modelos discretos mono e bidimensionais. São mencionadas as vantagens e desvantagens da utilização de cada um destes modelos.

3.1. Introdução

Para se poder avaliar, de uma forma expedita, os processos de transferência de calor transiente é fundamental criar um modelo numérico que represente as condições específicas do problema em estudo. Desta forma, o programa poderá simular o funcionamento do sistema em questão sob diferentes situações reais, permitindo observar o comportamento da solução adoptada.

No caso dos permutadores ar-terra foi elaborado um modelo discreto com o objectivo de estudar o comportamento térmico do permutador e do solo no qual está instalado. O programa foi criado para descrever o perfil de temperaturas e o fluxo de calor trocado com o solo em função do tempo, permitindo realizar análises paramétricas e estudar o impacto do sistema num edifício. Face à evolução das cargas térmicas de uma habitação o programa deve calcular a temperatura interior do edifício e verifica se esta é capaz de se manter dentro das condições de conforto térmico.

De um modo geral, o modelo construído considera o balanço térmico à superfície do solo geralmente utilizado na comunidade científica e a variabilidade das propriedades térmicas do solo em função das condições do terreno. A propagação do calor no solo está relacionada com o calor cedido nos tubos por parte do ar que neles circula. O caudal de ar é controlado, visando economizar o recurso térmico (solo) aumentando assim o tempo de saturação térmica do solo. Sempre que a temperatura ambiente tiver condições para garantir conforto térmico o modelo opta por não circular o ar nos tubos mas admitir directamente o ar exterior.

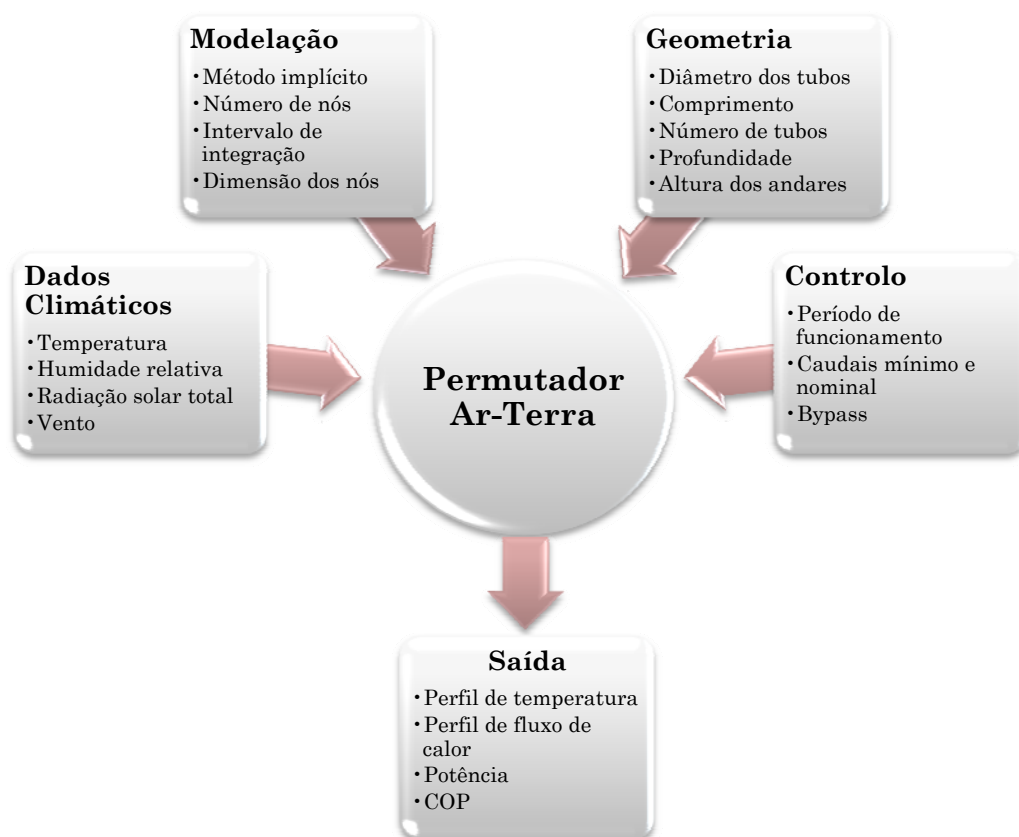


Figura 12- Estrutura do modelo numérico

A Figura 12 representa um esquema com as principais componentes do sistema, este inclui os parâmetros inerentes ao sistema bem como as variáveis de saída e entrada. Como pode ser observado, as variáveis de entrada estão distribuídas em grupos que permitem facilmente identificar quais são os sectores nos quais se pode intervir num projecto para adaptar a realidade no modelo.

O modelo numérico recorre ao método das diferenças finitas aplicado à equação geral da condução, com uma malha ortogonal e uniforme disposta no plano vertical e coincidente com o eixo dos tubos. A rede de nós é simétrica segundo o eixo dos tubos, isto é, a profundidade considerada desde a superfície do solo até o tubo é a mesma que a distância entre o mesmo tubo e o limite da camada de solo inferior ao tubo.

3.2. Modelo Físico do Permutador Ar-Terra

O permutador ar-terra tradicional é constituído por um conjunto de tubos paralelos dispostos horizontalmente no solo a uma profundidade “Y” definida pelo utilizador, como apresentado na Figura 13. A configuração mais comum dos tubos enterrados é com um único feixe de

tubos, no entanto, com o objectivo de otimizar o atravancamento da instalação foram estudadas soluções com múltiplos andares.

Os tubos de ar têm admissão directa de ar exterior, através de um compartimento comum que os liga ao exterior, e injecta o ar que neles circula directamente no espaço a climatizar. O caudal de circulação e as condições de fronteira são as mesmas para todos os tubos pelo que o comportamento esperado e a temperatura do ar à saída dos tubos também serão iguais.

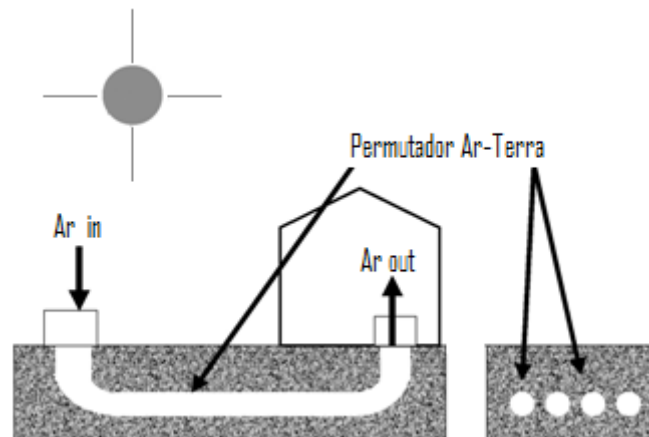


Figura 13- Esquema de um permutador ar-terra típico

O permutador possui dois colectores nas extremidades dos tubos enterrados. Um é o colector de admissão, que alimenta os tubos com ar exterior, e o outro é o colector de descarga que conduz o ar arrefecido/aquecido para o sistema de ventilação do edifício. Nestes colectores as tomadas de ar podem apresentar variadas configurações contudo, todas devem possibilitar o acesso a pessoal de manutenção da instalação. Na Figura 14 podem observar-se os modelos utilizados em alguns projectos já concluídos [5, 6]. O colector de saída do permutador, tem uma entrada de ar directo do exterior, para se poder efectuar um “bypass” ao permutador quando necessário, ou seja, sempre que o ar exterior apresente melhores condições que o ar à saída do permutador.

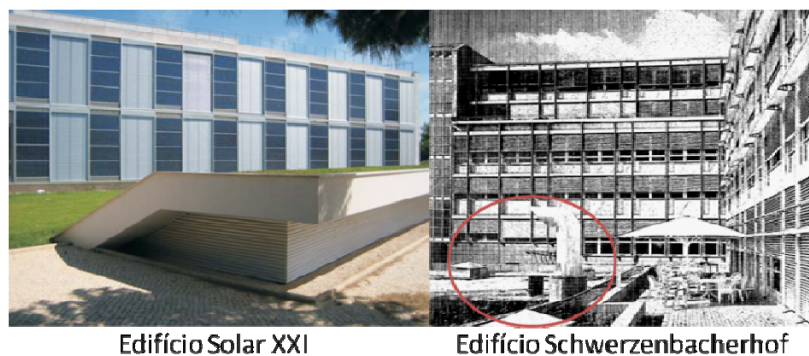


Figura 14- Soluções adoptadas em casos práticos

No colector de descarga encontra-se o ventilador que forçará a circulação do ar no sistema. Anexo a este encontra-se a conduta de alimentação do edifício, que alimenta o sistema de distribuição de ar para as várias fracções autónomas do edifício. A Figura 15 proporciona uma visão geral do sistema com os pormenores acima descritos.

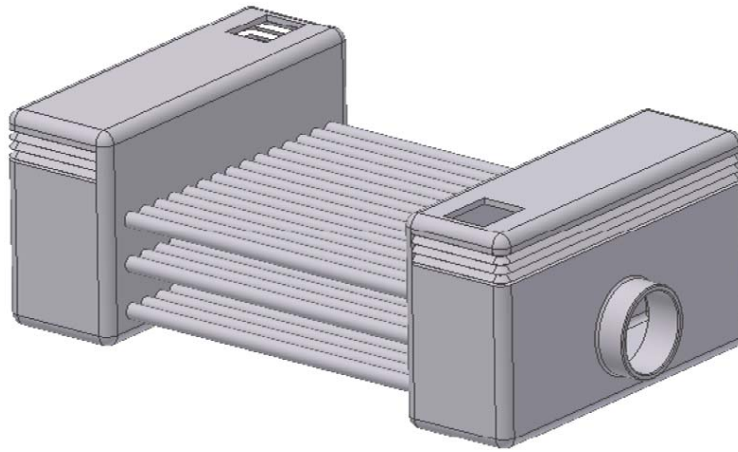


Figura 15- Permutador ar-terra modelado

O sistema funciona maioritariamente durante o período de arrefecimento. Neste caso, o permutador admite ar quente do ambiente exterior que, ao circular dentro dos tubos enterrados, perde energia para o solo e entra no espaço climatizado em condições de conforto, ou no sistema convencional de climatização para o ajuste final de temperatura e humidade. No período de aquecimento, o permutador ar-terra admite ar frio do ambiente e recebe o calor retido no solo da anterior temporada de arrefecimento. Novamente, se for necessário, o ar circulará também pelo sistema convencional. Por vezes, o ar exterior pode ser suficiente para vencer as cargas do edifício, pelo que o sistema também contempla a possibilidade de injectar directamente ar do exterior.

O sistema de tubos enterrados pode constituir o meio principal de climatização ou pode ser um apoio a sistemas convencionais. Neste último caso o ar pode não atingir, durante o período de funcionamento, as condições de conforto e antes de entrar no espaço circula por um sistema convencional que o trata de modo a que atinja as características desejadas.

Como já foi referido em ocasiões anteriores o modelo considerado é uma aplicação da transferência de calor por condução em regime transiente e como tal baseia-se na equação geral da difusão, eq. (6)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

A utilização da expressão (6) relativa a um sistema de coordenadas tridimensional traduz uma elevada complexidade de cálculo, desnecessária para a resolução do problema em causa, quer por meios analíticos quer por meios discretos. Com base em estudos prévios decidiu-se então utilizar um modelo baseado num sistema bi ou monodimensional.

Para traduzir matematicamente a configuração apresentada, o sistema deve ser ajustado de forma a ser construído o modelo físico e matemático do mesmo, a Figura 16 apresenta a geometria exacta utilizada para representar o permutador.

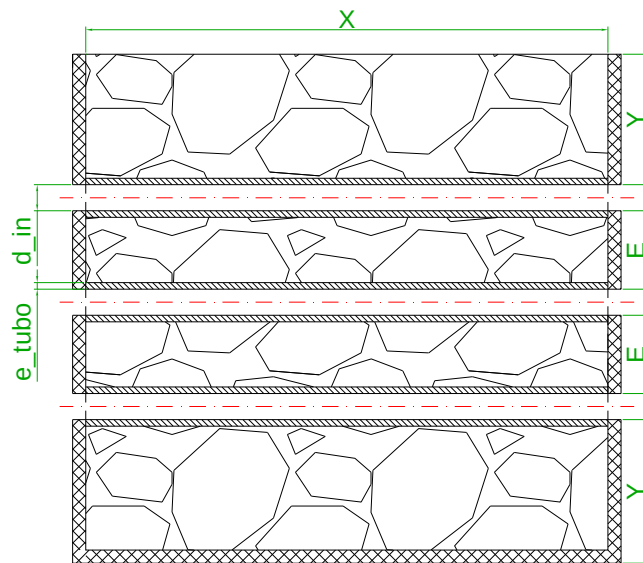


Figura 16- Esquema do modelo distribuído do permutador compacto

O comprimento dos tubos “X” é um parâmetro dado pelo utilizador, bem como a profundidade dos mesmos “Y” e “E”. O espaço que existe desde a superfície até o tubo é sempre igual a distância entre o tubo e o limite inferior do modelo.

A análise discreta considera uma malha que se estende no plano da Figura 16, ocupa toda a área que representa o solo e ainda uma linha de nós para o ar e o tubo. Todos os andares possuem o mesmo número de tubos “ N_t ”.

3.2.1. Número de Camadas do Permutador

Pergunta lógica a se fazer é: Quantos andares deve ter o permutador?

Regra geral, as soluções típicas dos tubos enterrados, com um único andar, implicam áreas de instalação bastante amplas, que podem não estar disponíveis, sobretudo quando se trata de zonas urbanas. Por isso é interessante considerar a possibilidade de modelar um permutador

com mais do que um feixe de tubos. Neste trabalho foram consideradas duas possíveis configurações: duas e três camadas. Um permutador com duas camadas permite estudar, à partida, qual o comportamento do solo entre camadas, quando é que este satura e a que temperatura. No entanto, mesmo com duas camadas não cobre todas as possíveis condições resultantes da utilização de múltiplas camadas. O modelo com três camadas de tubos consegue traduzir todas as combinações de fronteiras possíveis para os tubos enterrados. Neste são incluídos casos em que os tubos apenas têm solo até à superfície, tubos com camadas de solo intermédias e tubos em contacto com a camada final do solo e que acaba com uma condição isotérmica. Soluções com maior número de andares são análogas às já consideradas e, por este motivo, o estudo desenvolvido limita-se a três camadas de tubos.

Que critérios podem fundamentar a escolha do número de andares do permutador? Basicamente, há necessidade uma relação de compromisso entre o aproveitamento térmico do solo e a potência do permutador. Na solução de um andar o solo não é explorado de forma cabal, podendo existir zonas mortas do recurso que não são aproveitadas mesmo à custa de grandes áreas de ocupação. Um permutador com dois, ou mesmo três andares, aproveita melhor o solo, mas em contrapartida tende a saturá-lo mais rapidamente e desta forma sacrifica parte da potência do permutador.

3.2.2. *Vantagens e Desvantagens dos Modelos Matemáticos Adoptados*

Tendo em conta que o objectivo principal do programa é poder analisar o desempenho do permutador de tubos enterrados perante um edifício, optou-se por realizar três abordagens diferentes para modelar o sistema, estas são as seguintes:

- Modelo analítico monodimensional pelas Equações de Green e a sobreposição de efeitos.
- Modelo monodimensional discreto pelo método implícito.
- Modelo bidimensional discreto pelo método implícito.

Modelos Analíticos vs. Modelos Discretos

Quando comparadas as alternativas apresentadas nota-se, à partida, que um modelo analítico implica maior esforço matemático para obter a solução do sistema. As equações que resultam destes estudos são extensas e complexas e as soluções comportam muitas variáveis associadas o que por vezes é difícil de definir e caracterizar para aplicações específicas. No entanto, o

tempo e a dificuldade de cálculo destes modelos são mais reduzidos do que nos modelos discretos, isto permite obter resultados rápidos para casos simples.

Na recolha bibliográfica efectuada encontrou-se um modelo analítico sobre os permutadores enterrados [7] e adaptou-se a solução para que pudesse ser estudada e comparada com outros modelos. Mas apesar das claras vantagens de cálculo sobre os modelos discretos, a formulação teórica utilizada neste trabalho possui certas limitações que afastam o modelo da realidade e tornam mais apetecível a modelação discreta. Por exemplo, as oscilações da temperatura seguem uma série seno simples. Esta aproximação representa erros significativos na representação da evolução da temperatura ambiente ao longo do tempo, como ilustra a Figura 17. Outra consideração feita neste modelo, que também pode ser uma fonte de erro, é o facto de a temperatura da superfície do solo ser admitida igual à temperatura do ambiente, coisa que não se verifica na realidade.

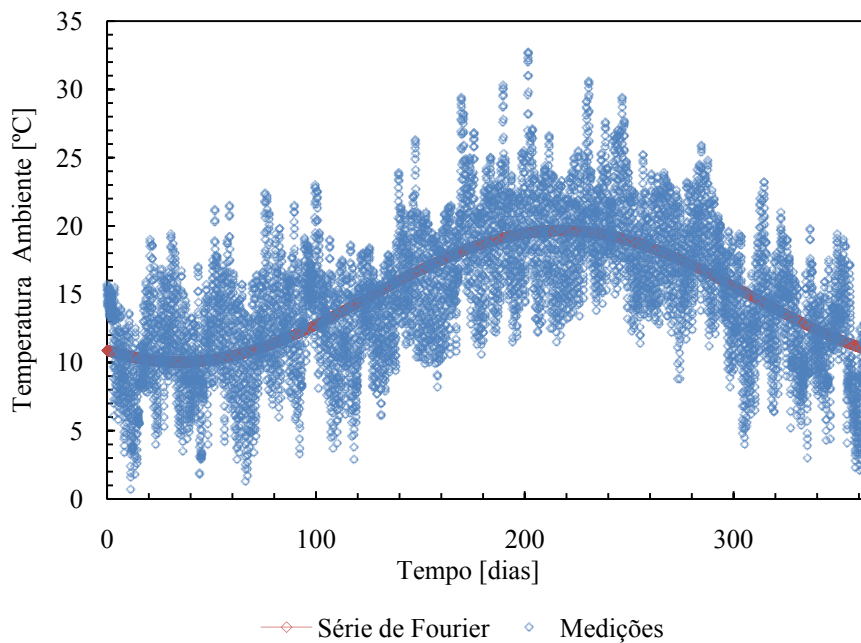


Figura 17- Evolução temporal da temperatura ambiente

Os modelos distribuídos seguem a formulação de diferenças finitas de controlo e o método integrativo implícito, que nestas condições são modelos de fácil formulação e rápida convergência. Ao contrário do modelo teórico, a temperatura da superfície do solo é calculada com um balanço energético avançado que tem sido alvo de muitos estudos reconhecidos a nível internacional [19, 25, 43]. Em tais estudos são utilizados os dados climáticos, medidos directamente nas zonas em estudo, retirados de software específico para o efeito (METEONORM [42]).

Modelos discretos Monodimensional vs. Bidimensional

Com o aumento das dimensões dos modelos discretos a complexidade de cálculo aumenta significativamente. No caso do permutador ar-terra existe a possibilidade da programação ser feita a uma ou duas dimensões. Como é de esperar, a formulação bidimensional traduz uma solução mais próxima da realidade e exacta do que o modelo monodimensional mas à custa de esforço de cálculo. Fenómenos como a distribuição do calor no solo podem ser melhor representados com malhas bidimensionais. No entanto, é de maior interesse avaliar o efeito dos modelos em causa nos parâmetros mais importantes do sistema, a saber, temperatura de saída, potência dissipada, etc.

3.3. Simplificações na Criação do Modelo

Em primeiro lugar, o solo é considerado como um meio contínuo e homogéneo. Contudo, os sistemas reais são constituídos por componentes heterogéneas em que as propriedades dos materiais mudam no espaço e no tempo. Nesses casos são construídas matrizes tridimensionais que descrevem a variabilidade de tais propriedades segundo as direcções X, Y, Z em cada instante de tempo. Para simplificar a carga de cálculo computacional, optou-se por considerar que o solo é uma mistura homogénea de ar, água e minerais. Nem a porosidade e nem a humidade do solo tem qualquer distribuição espacial, todo o sistema se encontra num meio seco, húmido ou totalmente saturado com porosidade uniforme. Tanto a capacidade térmica como a condutibilidade e a massa volúmica são parâmetros constantes ao longo de toda a malha representativa do solo e ainda constantes no tempo. Assim sendo, o único factor que influencia a direcção do fluxo de calor é o gradiente de temperaturas.

As extremidades dos tubos são limitadas segundo a largura da malha e as superfícies laterais do solo são consideradas isoladas. As pontas dos tubos estão conjugadas com seus respectivos colectores que, para todos os efeitos, representam a ligação directa quer ao exterior quer ao interior do edifício. Os colectores são revestidos, por questões de QAI, com materiais de baixa condutibilidade e que funcionam como isolante. Devido a este facto, as paredes laterais do solo são representadas como isoladas e a malha limita-se apenas ao solo.

Por outro lado, se os tubos subissem até a superfície, existiria um fluxo de calor entre o ar da porção vertical dos tubos e o solo, que poderia ser contabilizado no modelo com uma coluna adicional de nós que representasse o ar nestes locais. No entanto, face à relação de dimensões

entre as parcelas verticais e o comprimento efectivo do sistema, as trocas de calor nas partes verticais dos tubos podem ser desprezadas e a malha pode ser limitada ao solo, tal como já se havia afirmado.

A representação matemática do esquema é feita em coordenadas ortogonais. A disposição dos tubos permite considerar uma aproximação geométrica do sistema. Ver a explicação na Figura 18, desta forma não é necessário criar uma malha que se adapte às superfícies curvas dos tubos. Mesmo assim, os pormenores relativos a curvaturas não são de todo desconsiderados, estes são contidos, para facultar uma correcta descrição do funcionamento do permutador, nas próprias equações da transferência de calor dos tubos. A Figura 18 pretende representar um dos andares do permutador em corte, aplicando a simplificação acima descrita. É igualmente assumida para os restantes camadas do permutador.

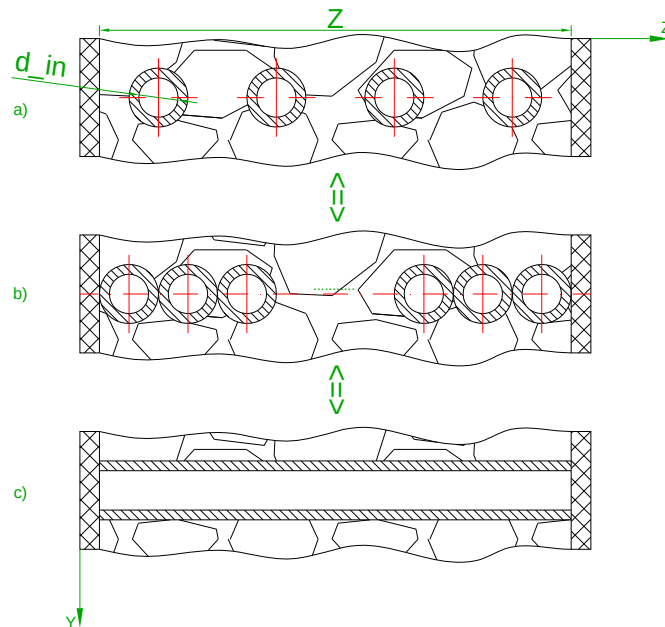


Figura 18- Simplificação na disposição dos tubos enterrados

Neste modelo os tubos do permutador estão dispostos lado a lado sem nenhum espaçamento entre eles, esta prática é comum em vários casos práticos em que tais sistemas têm sido instalados [6]. Nenhum dos modelos tem por objectivo avaliar qual é o espaçamento óptimo entre tubos laterais para evitar a saturação acelerada do solo, podendo ser assunto de trabalhos futuros, no entanto, é estudado o espaço entre tubos de andares diferentes. Por outro lado, a situação apresentada traduz a situação crítica quanto à distribuição do feixe de tubos de cada camada, qualquer afastamento entre eles supõe uma melhoria da capacidade do sistema.

A simplificação considerada indica que o fluxo de calor entre tubos é desprezável e, como tal, é como se os tubos estivessem todos juntos (Figura 18.b), ou seja, no plano horizontal ao nível dos tubos admite-se temperatura constante no plano XZ. Por este motivo é razoável considerar que o ar circula entre duas placas planas cuja largura corresponde à superfície dos tubos planificada (Figura 18.c).

No modelo monodimensional o solo é dividido em camadas horizontais dispostas segundo a direcção “y”, cada uma destas camadas é considerada à temperatura uniforme. A condução dominante é a vertical (y) e o efeito de inércia que intervém na performance do permutador é unicamente nesta direcção, uma vez que não se considera a condução nas direcções “x” e “z”.

Já no caso da formulação bidimensional além de se considerar a condução na vertical (y) também é levada em conta a propagação do calor na direcção do eixo dos tubos. Numa visão mais próxima da realidade nota-se que, por exemplo, na época de arrefecimento, o ar que entra nos tubos aquece na zona de entrada, criando um diferencial de temperaturas que dá origem a fluxos horizontais na direcção do eixo (x).

3.4. Modelo Analítico

A resolução analítica de problemas de condução instacionária pode ser feita com base na formulação global, formulação integral, separação de variáveis, integral de Duhamel, transformada de Laplace, equação de Green, etc. [44, 45]. O modelo teórico utilizado, Figura 19, recorre às equações de Green, e numa formulação simplificada, à sobreposição de efeitos para integrar o modelo do solo não perturbado com o efeito do permutador ar-terra.

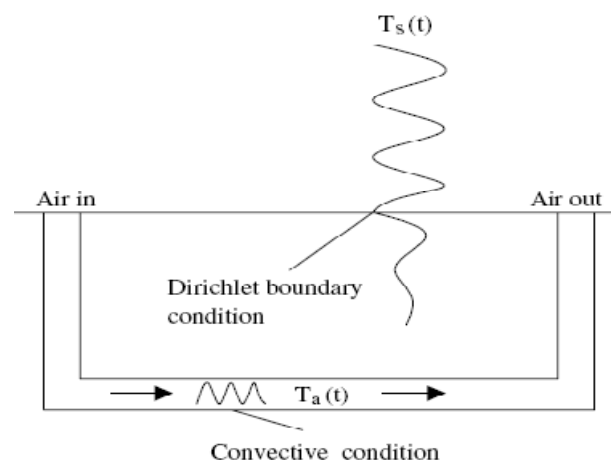


Figura 19- Esquema do modelo analítico

Na solução proposta por M. Cucumo [7], a temperatura à superfície do solo é calculada por uma série de Fourier, eq. (7), cujas constantes correspondem aos parâmetros da temperatura ambiente.

$$T(0, t) = T_{s,m} + \Delta T_{s,m} \cos \omega(t - t_s^*) \quad (7)$$

$$T(\infty, t) = T_{s,m} \quad (8)$$

Aplicando as condições de fronteira acima para um meio sólido contínuo, homogéneo e semi-infinito a solução obtida passa por incluir as flutuações diárias e anuais da temperatura ambiente e a condição de fronteira no infinito, eq. (8). Sobrepondo as duas soluções obtém-se a temperatura do solo em função do tempo e da profundidade, eq. (9).

$$\begin{aligned} T_G(x, t) = T_{s,y} + \Delta T_{s,y} e^{-\sqrt{\frac{\omega_y}{2\alpha}}x} \cos \left[\omega_y(t + \tau - \tau_0) - \sqrt{\frac{\omega_y}{2\alpha}}x \right] \\ + \Delta T_{s,d} e^{-\sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha}}x} \cos \left[\omega_d(t - t_s^*) - \sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha}}x \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Onde:

ω_y – Frequência de oscilação anual [rad/s]

ω_d – Frequência de oscilação diária [rad/s]

τ e τ_0 – Constantes de tempo medidas desde o início do ano e que, para os cálculos realizados, são iguais, pelo que podem ser excluídas da equação (9).

As equações que traduzem a transferência de calor nos tubos também dividem as flutuações da temperatura exterior, a equação (10) representa os resultados para uma temperatura do ar média diária, enquanto a equação (11) está relacionada com as flutuações diárias. Sobrepondo ambas resulta a equação que governa a contribuição do tubo enterrado equação (12).

$$\begin{aligned} T_{HEI}(x, t) = [\bar{T}_a - T_G(b, t_1)] \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{|b - x|}{2\sqrt{\alpha(t - t_1)}} \right) \right. \\ \left. - e^{\left[\frac{h_c|b-x|}{\lambda_{solo}} + \frac{h_c^2\alpha(t-t_1)}{\lambda_{solo}^2} \right]} \operatorname{erfc} \left(\frac{|b - x|}{2\sqrt{\alpha(t - t_1)}} + \frac{h_c\sqrt{\alpha(t - t_1)}}{\lambda_{solo}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$T_{HEII}(x, t) = \frac{\Delta T_{a,d} e^{-|b-x|\sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha}}}}{\sqrt{1 + 2\beta + 2\beta^2}} \cos \left[\omega_d(t - t_a^*) - |b - x|\sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha}} - \varepsilon \right] \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 T_{HE}(x, t) = [\bar{T}_a - T_G(b, t_1)] & \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{|b - x|}{2\sqrt{\alpha(t - t_1)}} \right) \right. \\
 & - e^{\left[\frac{h_c|b-x|}{\lambda_{solo}} + \frac{h_c^2 \alpha(t-t_1)}{\lambda_{solo}^2} \right]} \operatorname{erfc} \left(\frac{|b - x|}{2\sqrt{\alpha(t - t_1)}} + \frac{h_c \sqrt{\alpha(t - t_1)}}{\lambda_{solo}} \right) \Bigg\} \\
 & + \frac{\Delta T_{a,d} e^{-|b-x|\sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha}}}}{\sqrt{1 + 2\beta + 2\beta^2}} \cos \left[\omega_d(t - t_a^*) - |b - x|\sqrt{\frac{\omega_d}{2\alpha}} - \varepsilon \right]
 \end{aligned} \quad (12)$$

Em que,

$$\bar{T}_a = T_{a,d} + \frac{\Delta T_a}{\omega_d(t - t_1)} \{ \operatorname{sen}[\omega_d(t - t_a^*)] - \operatorname{sen}[\omega_d(t_1 - t_a^*)] \} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\lambda_{solo}}{h_c} \left(\frac{\pi}{\alpha t_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$\varepsilon = \tan^{-1} \left(\frac{\beta}{\beta + 1} \right) \quad (15)$$

Desta forma, o resultado final para o modelo do perfil de temperatura do solo, em função da profundidade “x” e do tempo “t” para um tubo à profundidade “b”, é obtido da soma das duas equações anteriores, eq. (16).

$$T(x, t) = T_G(x, t) + T_{HE}(x, t) \quad (16)$$

O coeficiente de transferência de calor convecção (h_c) utilizado é obtido a partir da expressão (17). As variáveis relativas a médias e amplitudes térmicas foram aproximadas a partir de dados discretos recolhidos do METEONORM. As propriedades do solo foram calculadas conforme apresentado no Capítulo 2.

$$h_s = 0,5 + 1,2 \cdot \sqrt{|v_{amb}|} \quad (17)$$

3.5. Modelo Discreto

A formulação discreta é uma técnica bastante desenvolvida que frui de muitos métodos de cálculo para a resolução de problemas discretos, entre os quais se destacam:

- Diferenças Finitas (série de Taylor)

- Volumes de controlo
- Elementos Finitos
- Resíduos Pesados

De salientar ainda que, quando se referem a fenómenos transientes, há três métodos de integração que surgem como os mais utilizados:

- Método Implícito
- Método Explícito
- Crank-Nicolson

Os programas desenvolvidos neste trabalho, visto serem problemas de condução instacionária, recorrem às diferenças finitas integradas com o método implícito. Escolheu-se este método de integração por ser de fácil aplicação, apresentar os resultados mais realistas e possuir menos restrições nas condições de convergência.

Ao volume de controlo, basicamente, é aplicado um balanço energético para cada nó da malha previamente definida. Neste balanço são definidas as trocas de calor nas fronteiras do nó com os nós vizinhos ou com o exterior.

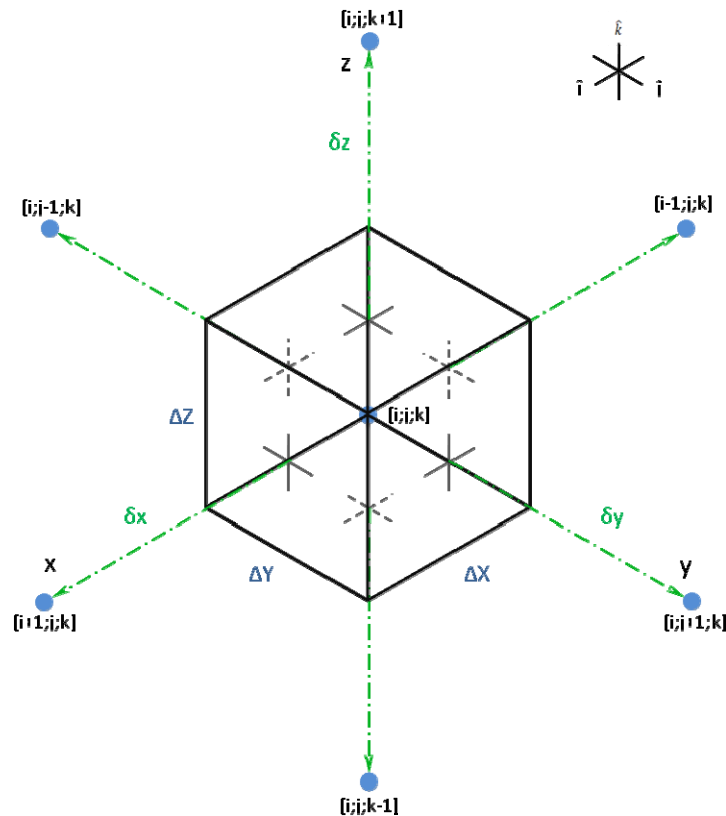


Figura 20- Cubo elementar da modelação discreta

A Figura 20 representa a formação genérica de um volume de controlo elementar (ΔV) com os nós vizinhos. Apresenta as ligações de fronteira entre nós que, neste caso, são traduzidas por fluxos condutivos. Cada par de nós colineares está separado do volume da mesma distância (δ) e nestas condições, a expressão da difusão assume a forma genérica apresentada na expressão (18).

$$\begin{aligned}
 & \frac{\lambda_{solo}}{\delta_x} \Delta Y \Delta Z (T_{[i+1;j;k]} + T_{[i-1;j;k]} - 2T_{[i;j;k]}) \\
 & + \frac{\lambda_{solo}}{\delta_y} \Delta X \Delta Z (T_{[i;j+1;k]} + T_{[i;j-1;k]} - 2T_{[i;j;k]}) \\
 & + \frac{\lambda_{solo}}{\delta_z} \Delta X \Delta Y (T_{[i;j;k+1]} + T_{[i;j;k-1]} - 2T_{[i;j;k]}) + Fonte \\
 & = \rho \cdot \Delta V \cdot C_p \frac{T_{[i;j;k]} - T_{[i;j;k]}^0}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{18}$$

A expressão é válida para qualquer modelo, mono, bi e tridimensional sendo necessário efectuar o respectivo ajuste para cada caso.

Sendo que os modelos produzidos são muito semelhantes serão explicados em simultâneo. Explicando-se, em cada tópico, as características particulares de cada programa.

3.5.1. *Geração da Malha para o Caso Mais Complexo (3 Camadas)*

Após se definir a configuração geométrica do sistema, a geração de uma malha adequada torna-se o âmagio de uma resolução satisfatória. Uma malha bem consolidada pode reduzir em muito o tempo de cálculo do programa, como pode aumentar a capacidade de processamento de informação em zonas onde esta seja muito densa.

O plano de trabalho para a concepção das malhas utilizadas corresponde a um plano vertical coincidente com o eixo dos tubos, esta escolha permite aproveitar a simetria existente. O modelo construído, nestas condições, só precisa de simular um único tubo e posteriormente multiplicar o resultado pelo número total de tubos.

A área que a malha abrange está limitada, na vertical, pela superfície do solo, paredes dos tubos e uma profundidade final do solo no limite inferior da malha, neste último caso, numa condição isotérmica. O comprimento (x) da malha é definido pelo comprimento dos tubos e

pelas faces do tubo que ficam em ambos lados coincidentes com os limites da malha. O espaçamento dos nós é, nos dois casos, considerados, uniforme.

A malha monodimensional é uma coluna de nós que subdivide o solo em “N” patamares iguais na direcção “y”. As camadas limites são as únicas cujos elementos finitos possuem metade da espessura e esta característica é comum a todos os elementos que fazem a fronteira do sistema. Existem ainda, nós exclusivos para a parede do tubo e para o ar que nele circula, cuja altura das camadas que estão associadas corresponde à espessura do tubo e ao diâmetro interno do mesmo. O esquema da Figura 21 permite visualizar claramente a configuração da malha.

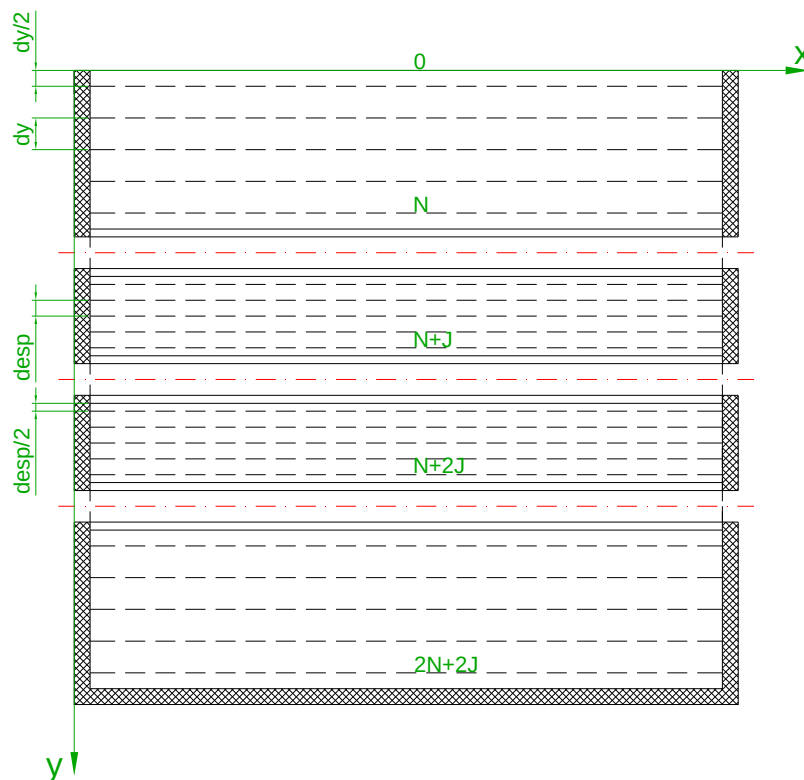


Figura 21- Malha monodimensional

No caso do modelo bidimensional (Figura 22) a malha é gerada de forma idêntica ao modelo monodimensional, a distribuição em “y” é em todo semelhante e a configuração em “x” segue o mesmo princípio, isto é, áreas iguais nos nós interiores e metade da área nos nós limites do sistema.

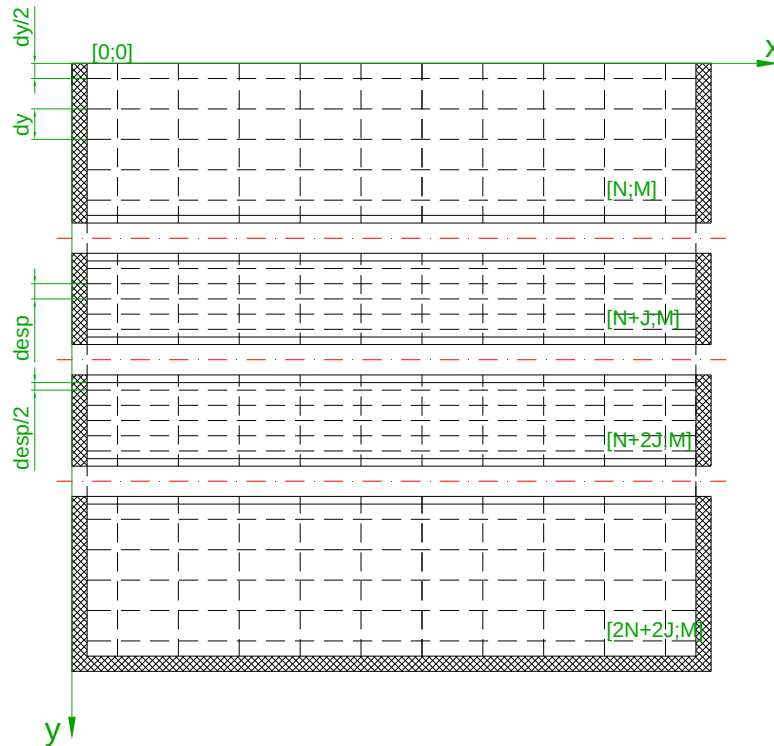


Figura 22- Malha bidimensional

Para definir a densidade da malha, apropriada para os modelos estudados, foi feita uma análise paramétrica dos nós que as compõem, com base no número de nós associado às áreas limites superior e inferior do modelo (N), às zonas intermédias aos tubos (J) e ao comprimento do tubo (M). Assim sendo, avaliou-se as variações causadas por cada um dos parâmetros mencionados numa das variáveis mais importantes do modelo, a temperatura de saída do permutador.

Como se observa na Figura 23, para um determinado instante, a temperatura do ar à saída do permutador não tem grandes variações resultantes do aumento, ou diminuição, do número de nós, na realidade, apenas apresenta uma amplitude máxima e majorada de $0,3$ $^{\circ}\text{C}$. Assim sendo, o número de nós atribuídos para a construção da malha não necessita ser elevado para simular com exactidão o comportamento dos “buried pipes”.

De notar que a análise apresentada na Figura 23 representa a zona do sistema que normalmente possui uma grande sensibilidade em todo o processo.

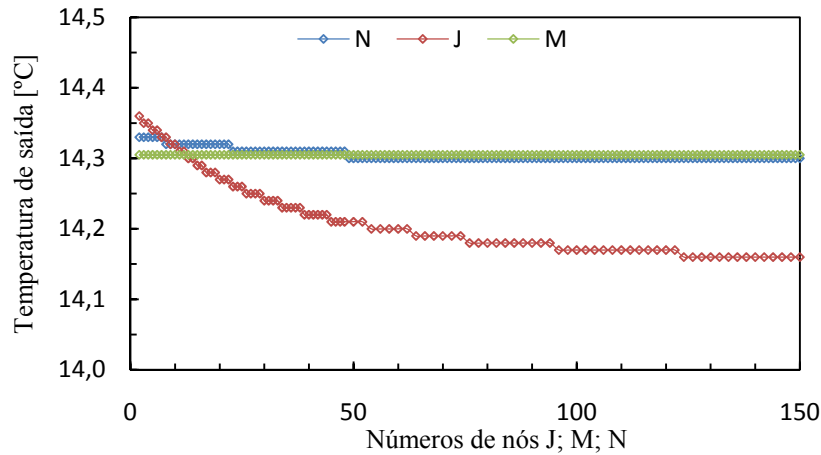


Figura 23- Análise paramétrica do número de nós J, M, N

Mesmo com o número de nós relativamente baixo os parâmetros podem ser afinados para apresentar resultados realistas sem enfrentar muito tempo de cálculo. Para efectuar estes ajustes recorreu-se a variáveis sensíveis no sistema, tais como as do fluxo de calor no solo. A Figura 24 reúne três simulações com diferente quantidade de nós. A primeira delas, a curva com menos nós, cria patamares intermédios que não existem na realidade, pelo que seus resultados podem ser melhorados com recurso a malhas mais densas. Nas outras duas simulações os resultados são bastante próximos e já se encontra definido o ponto de fluxo nulo que existe no sistema. Assim sendo, uma das duas últimas opções pode ser uma boa solução para o número de nós do modelo, considerando ainda que quanto menos nós constituir o modelo de cálculo mais rápido é a sua resolução. Neste caso, optou-se por escolher um modelo numérico com um total de 45 nós, no caso monodimensional, e 405 no bidimensional, com base nas conclusões apresentadas.

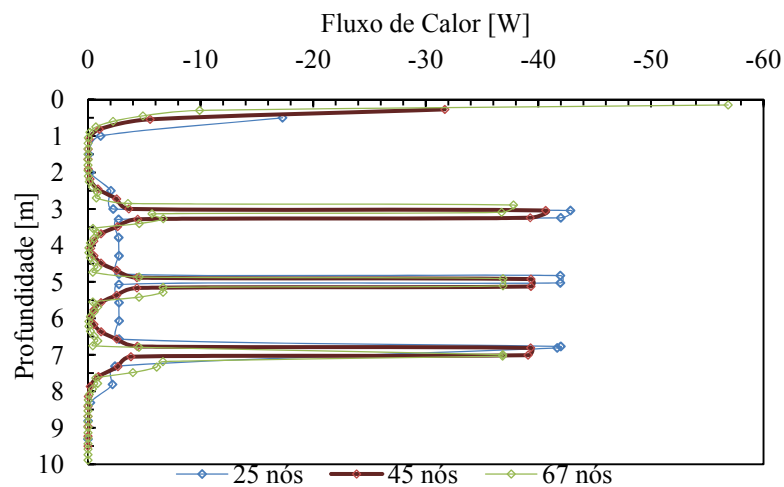


Figura 24- Perfil de fluxo de calor para vários N e J

Para o dimensionamento da malha o número de nós, quer na vertical (N e J) quer na horizontal (M), pode ser definido separadamente pelo utilizador. Nas simulações efectuadas neste trabalho foram escolhidos, para o modelo monodimensional; N=11 pontos e J=9 pontos, para o bidimensional, N=11 pontos, J=9 pontos; e M=9 pontos. As variáveis “X” e “Y” são de fácil alteração de acordo com a opção do utilizador.

Uma vez definida a malha a utilizar esta precisa de ser contextualizada com as condições sob as quais irá funcionar. Tais condições são introduzidas nas fronteiras da malha (ligações com o exterior) e estão definidas no tópico seguinte.

3.5.2. Condições de Fronteira

As condições de fronteira são condições específicas do problema concreto que permite obter a solução específica para o conjunto de equações genéricas resultantes dos princípios da conservação da massa e energia. Estas mesmas condições aplicam-se aos modelos discretos que já foram apresentados para obter as soluções específicas do problema em causa. No modelo do permutador ar-terra as fronteiras estão localizadas à superfície do solo, nas superfícies laterais e inferior da secção do solo onde o tubo está enterrado, no ar que circula dentro dos tubos e mesmo no interior do solo.

Superfície do solo

Na superfície do solo as condições de fronteira são representadas por um balanço energético que contempla trocas de calor² por radiação, convecção e evaporação. Como resultado do balanço energético o calor transmitido é armazenado no solo propagando-se para os nós internos por condução. O balanço energético à superfície pode ser apresentado pela expressão (19).

$$Q_{arm} = Q_{ri} + Q_{re} + Q_{ev} + Q_{cv} + Q_{cd} \quad (19)$$

Aplicando o princípio da equação (19) a um nó específico da superfície dá origem às seguintes expressões, eq (20) a (24) respectivamente.

² Embora não seja necessário, as expressões utilizadas nos modelos contêm todas as dimensões do volume elementar. Estas são introduzidas para visualizar facilmente as superfícies de transferência de calor implicadas em cada equação.

$$Q_{arm} = \rho \cdot \Delta V \cdot C_p \frac{T_{sup} - T_{sup}^0}{\Delta t} \quad (20)$$

$$Q_{ri} = \alpha_{solo} X \cdot Z \cdot I_{sol} \quad (21)$$

$$Q_{re} = -\varepsilon_{solo} \cdot \sigma \cdot X \cdot Z \cdot (T_{sup}^4 - T_{amb}^4) \quad (22)$$

$$Q_{ev} = -0,0168 \cdot f \cdot X \cdot Z \cdot h_{sup} \cdot [(103 \cdot T_{sup} + 609) - \phi_{ar} \cdot (103 \cdot T_{amb} + 609)] \quad (23)$$

$$Q_{cv} = \alpha_{sup} \cdot X \cdot Z \cdot (T_{amb} - T_{sup}) \quad (24)$$

As expressões apresentadas estão dependentes de uma quantidade de variáveis que se apresentam seguidamente:

- A radiação solar provém dos dados climáticos para a zona em estudo, sendo utilizada a radiação total sobre uma superfície horizontal, sendo necessário determinar a emissividade do solo [46], a qual oscila entre 0,85 a 0,99 sendo, para efeitos deste trabalho, considerada um valor médio de 0,95. Da mesma forma foi admitido um coeficiente de absorção constante $\alpha_{solo} = 0,2$.
- Nas trocas de calor evaporativas, eq (23), o factor “f” é um parâmetro relacionado com a humidade do solo, e que assume valores consoantes a humidade da superfície do solo, de uma forma geral podem assumir-se os seguintes valores:
 - $0,1 < f < 0,2$ – Superfícies áridas
 - $0,4 < f < 0,5$ – Superfícies secas
 - $0,6 < f < 0,8$ – Superfícies húmidas
 - $f=1$ – Superfícies saturadas
- O coeficiente de convecção à superfície (α_{sup}) [19] é dado pela expressão (25), em que a v_{amb} é obtida de dados climáticos horários.

$$\alpha_{sup} = 0,5 + 1,2 \cdot \sqrt{|v_{amb}|} \quad (25)$$

- O volume elementar depende do tipo de nó em causa. No modelo monodimensional o elemento é a camada superficial do solo, o volume é dado pelas equações (26) e (27), em que “ N_t ” é o número de tubos paralelos do permutador.

$$\Delta V = X \cdot \frac{\delta y}{2} \cdot Z \quad (26)$$

$$Z = \pi \frac{d}{2} N_t \quad (27)$$

No caso da malha bidimensional existem dois tipos de nós com volumes diferentes, nós centrais equação (28) e nós extremos equação (29), que são os cantos da malha.

$$\Delta V = \delta X \cdot \frac{\delta y}{2} \cdot Z \quad (28)$$

$$\Delta V = \frac{\delta x}{2} \cdot \frac{\delta y}{2} \cdot Z \quad (29)$$

Na Figura 25 (a, b e c) são apresentados, de forma esquemática os balanços energéticos aplicados a cada elemento os nós centrais e extremos do modelo a duas dimensões, e representa o patamar superficial do modelo monodimensional.

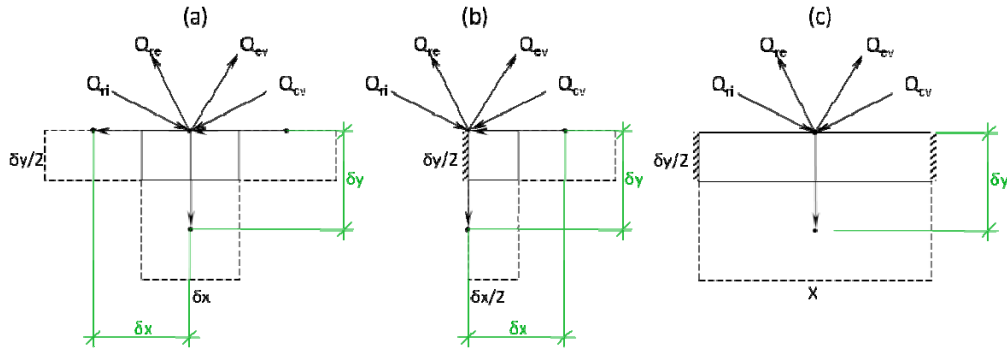


Figura 25- Nós da superfície do solo típico de cada fronteira física

Como resultado da aplicação, aos diferentes elementos, as condições de fronteira é possível obter para os casos a, b e c resultam as expressões (30), (31) e (32) respectivamente.

$$Q_{cd} = \frac{\lambda_{solo}}{\delta_x} \frac{\delta_y}{2} Z (T_{[i+1;0]} + T_{[i-1;0]} - 2T_{[i;0]}) + \frac{\lambda_{solo}}{\delta_y} \delta_x Z (T_{[i;0]} - T_{[i;1]}) \quad (30)$$

$$Q_{cd} = \frac{\lambda_{solo}}{\delta_x} \frac{\delta_y}{2} Z (T_{[i+1;0]} - T_{[i;0]}) + \frac{\lambda_{solo}}{\delta_y} \frac{\delta_x}{2} Z (T_{[i;0]} - T_{[i;1]}) \quad (31)$$

$$Q_{cd} = \frac{\lambda_{solo}}{\delta_y} X \cdot Z (T_{[i;0]} - T_{[i;1]}) \quad (32)$$

Superfícies adiabáticas

Na modelação do permutador de calor, as paredes laterais da malha foram consideradas fronteiras com fluxo de calor nulo, ou seja, adiabáticas. Sendo assim, os nós que compõem a malha só trocam calor com os nós vizinhos e não com o exterior.

As fronteiras laterais podem ser consideradas adiabáticas por vários motivos. Em primeiro lugar, porque a intensidade do fluxo de calor na horizontal, devido aos gradientes de temperatura, é bastante baixo. Assim sendo, o calor não tende a difundir-se na direcção horizontal pelos topos dos tubos e concentra-se nas zonas acima e abaixo das camadas. É por este motivo que muitos investigadores que têm estudado os permutadores ar-terra apenas como um problema monodimensional.

De considerar ainda que, as superfícies laterais da malha estão em contacto com as paredes dos colectores de entrada e saída e fase ao problema físico podem-se admitir isolados por um conjunto de factores. Para garantir as condições de QAI em todo o sistema, os colectores são revestidos por camadas interiores de EPOXY que tipicamente possuem baixas condutibilidades térmicas, actuando como isolamento nas paredes laterais do solo. No ITE-50, publicado pelo LNEC, a resina epoxídica tem uma condutibilidade relativamente baixa, $0,20 [W/m^{\circ}C]$, quando comparada com as propriedades do solo, que é dez vezes superior, pode-se admitir que o fluxo de calor através dos limites laterais do solo é tão baixo que pode ser desprezado. Esta é a principal razão pela qual não foi considerada a variação de temperatura ao longo de cada um dos colectores de entrada e saída.

Finalmente, um outro aspecto importante para a condição de parede isolada está centrado na relação entre a profundidade e o comprimento dos tubos, o que mostra que a quantidade total de energia transferida nestas superfícies pode ser desprezada. Um sistema típico com 4 [m] de profundidade e 40 [m] de comprimento impõe uma relação de 1 para 10 com respeito às trocas de calor.

A Figura 26 mostra dois tipos de configurações geométricas para as fronteiras adiabáticas e que se apresentam no sistema à direita e à esquerda da malha.

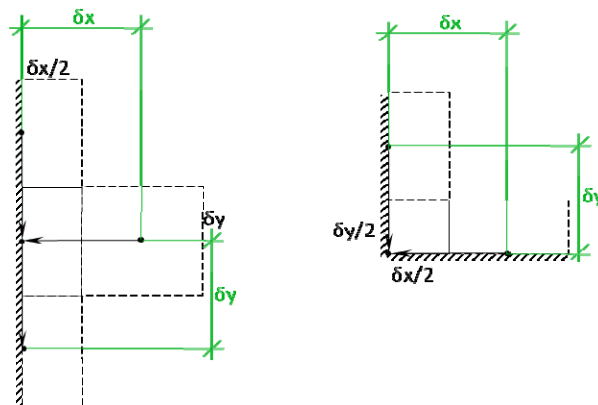


Figura 26- Nós das paredes laterais

Estas configurações existem de forma simétrica no lado direito da malha.

Não sendo considerada fronteira do sistema dentro do solo delimitado pelos tubos existe um ponto de fluxo nulo, no caso do sistema com múltiplas camadas. Este não corresponde necessariamente ao ponto médio entre as camadas pelo facto das condições envolventes não serem simétricas. O gradiente de temperaturas entre nós sucessivos bem como a intensidade do fluxo diminuem à medida que aumenta a distância ao tubo. De salientar ainda que, a posição do ponto adiabático varia ao longo do tempo e o mesmo ocorre com a temperatura do ponto.

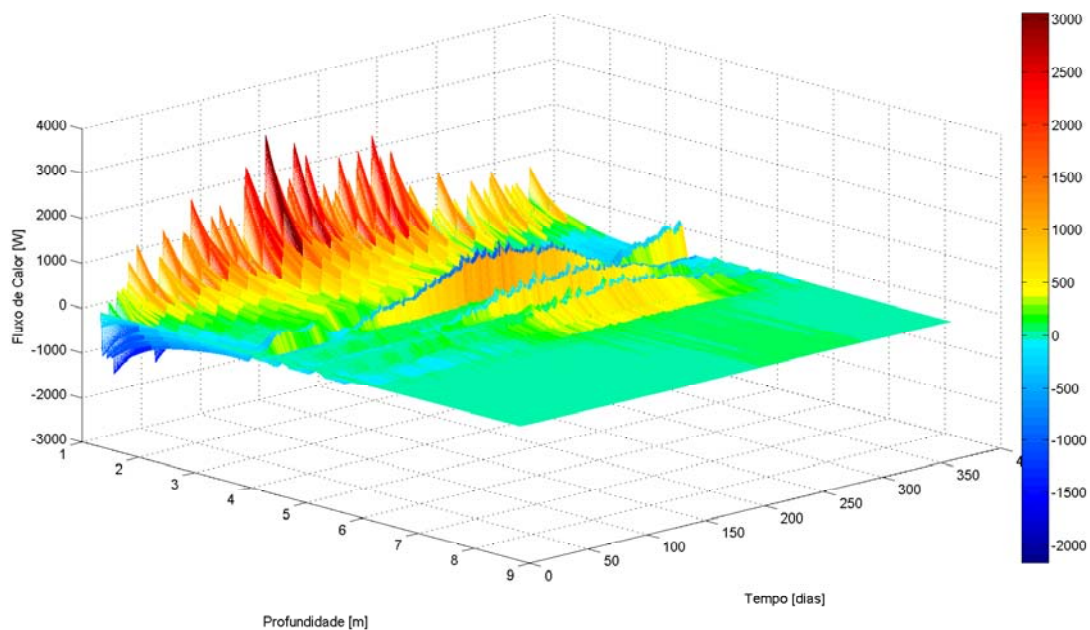


Figura 27- Evolução temporal do perfil de calor

A Figura 27 apresenta os efeitos dos pontos adiabáticos com temperaturas variáveis no tempo. Nesta figura para que a escala utilizada não ocultasse os resultados obtidos nos três andares dos tubos foram incluídos os pontos da malha a partir de um metro de profundidade. As três protuberâncias intermédias (3, 4 e 5 [m]) correspondem aos patamares dos tubos enterrados, ou seja, às camadas. A observação simples do gráfico permite concluir que o comportamento dos tubos é diferente nos três andares, e que o fluxo de calor nulo não se mantém constante ao longo do tempo nem para igual profundidade.

Isotérmica

A partir de uma certa profundidade, a difusão do calor resultante da acção do permutador ar-terra deixa de marcar presença podendo por este motivo considerar-se que a temperatura ao

longo do tempo é constante. Uma vez que não ocorre variação significativa do gradiente de temperaturas, este pode ser desprezado, sendo o fluxo de calor nulo, tratando-se de um comportamento semelhante ao de uma superfície adiabática.

Para efeitos da programação admitiu-se tal condição de fronteira a uma profundidade medida a partir da última camada mais profunda, cuja distância é igual à profundidade do tubo da primeira camada.

Com base nas considerações efectuadas, é atribuída uma temperatura constante, igual a média anual da temperatura do solo (15 [°C]), para todos os nós pertencentes ao limite inferior da malha do modelo discreto.

Parede interna do tubo

Os nós do tubo interligam com o ar exterior que circula no seu interior, sendo a convecção forçada o mecanismo base que domina o fenómeno de transferência de calor no interior dos tubos enterrados.

A propagação por condução entre a superfície interior do tubo e o seu exterior dá-se de forma semelhante à apresentada pelo que não tem interesse repetir essas expressões. Apenas tem interesse analisar a convecção forçada e as condições que ela apresenta.

Para os caudais de funcionamento do permutador o ar escoará sempre em regime permanente plenamente desenvolvido, assim sendo, o número de Nusselt obtêm-se pelas expressões (33) e (34).

$$\overline{Nu} = 0,023 \cdot \overline{Re}^{0,8} \cdot Pr^n \quad (33)$$

$$\overline{Nu} = 4,36 \quad (34)$$

$$\begin{cases} T_{tubo} < T_{ar} \rightarrow n = 0,3 \\ T_{tubo} > T_{ar} \rightarrow n = 0,4 \end{cases}$$

E o coeficiente de convecção pela equação (35),

$$\alpha_{ar} = \overline{Nu} * \frac{\lambda_{ar}}{d_{in}} \quad (35)$$

Pode admitir-se um escoamento plenamente desenvolvido tendo como base a razão entre o comprimento total dos tubos e o comprimento de desenvolvimento³. Do ponto de vista da

³ As expressões (36) a (39), relativas ao comprimento de desenvolvimento do escoamento, foram retiradas dos livros “Fluids Mechanics” [47] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 5th ed. McGraw-Hill: Boston, 2003. e

mecânica de fluidos, o comprimento de desenvolvimento é obtido à partir das expressões (36), para o regime laminar, e (37), para o regime turbulento.

$$\frac{L_e}{d_{in}} \approx 0,06 \overline{Re} \quad (36)$$

$$\frac{L_e}{d_{in}} \approx 4,4 \overline{Re}^{\frac{1}{6}} \quad (37)$$

Num permutador de tubos enterrados típico, com uma velocidade de escoamento de aproximadamente 3 a 4 [m/s], tubos de 35 [m] de comprimento e 0,1 [m] de diâmetro, o escoamento atinge um comprimento de desenvolvimento de 2,37 [m], o que corresponde a 6,8 % do comprimento total dos tubos.

Por outro lado, do ponto de vista da transferência de calor, a camada limite térmica pode desenvolver-se mais rapidamente do que a camada limite hidrodinâmica antes mencionada, pois conforme a expressão (38), para um escoamento laminar, fluido com Pr inferior a 1 o comprimento de desenvolvimento é menor. No caso do regime turbulento os resultados da expressão (39) também são menores que o seu equivalente hidrodinâmico.

$$\frac{L_e}{d_{in}} \approx 0,05 \overline{Re} Pr \quad (38)$$

$$\frac{L_e}{d_{in}} \approx 10 \quad (39)$$

Novamente, nas condições do permutador mencionado acima, a camada limite térmica desenvolve-se no primeiro metro do comprimento do tubo, representado apenas 2,9 % do mesmo.

Face os valores apresentados pode-se admitir que os efeitos do comprimento de desenvolvimento no desempenho do permutador são desprezáveis. Assim sendo considera-se um escoamento plenamente desenvolvido em toda a extensão dos tubos do permutador.

No sentido de simplificar o processo, o calor por convecção é determinado com base na temperatura média do escoamento entre a entrada e a saída ou entre nós vizinhos, conforme o modelo. O balanço energético afecto ao ar, eq. (40), permite observar todos os pormenores mencionados.

“Fundamentals of Heat and Mass Transfer” [48] F. P. Incropera, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th ed ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2007..

$$\rho_{ar} \cdot c_{p_{ar}} \cdot v_{ar} \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{in}^2}{4} (T_{in} - T_{out}) = \alpha_{ar} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot d_{in} (\bar{T}_{ar} - T_{tubo}) \quad (40)$$

Tendo presente a simplificação do modelo admite-se que a inércia do ar é desprezável e o fluxo de calor absorvido tubo metade é absorvido pela parte superior e metade pela inferior, segundo o gradiente de temperatura. Todas as propriedades necessárias para o cálculo destes coeficientes (Nu e α_{ar}) foram obtidas com recurso aos dados climáticos horários da localidade em estudo e às funções de propriedades térmicas internas do EES.

3.6. Potências e COP/EER

O arrefecimento por tubos enterrados é uma tecnologia de baixo consumo, de facto o único consumo energético envolvido nestes permutadores é a potência do ventilador. Neste tópico apresenta-se o cálculo utilizado para dimensionar o ventilador do sistema, nomeadamente potência do permutador ar-terra e o respectivo COP⁴ ou EER⁵.

3.6.1. Potência do Ventilador

O consumo da ventilação do sistema é determinado pelas perdas de carga (ΔP) durante todo o trajecto do ar circulado pelo ventilador. Este percurso é contabilizado desde a entrada nos tubos do permutador até a entrada nas zonas de insuflação, os colectores de entrada e saída do permutador não são contabilizados uma vez que estes são espaços muito amplos, provavelmente com ΔP reduzidos e com configurações feitas à medida das necessidades de cada caso. No entanto, o valor atribuído nas perdas do edifício é sobredimensionado para compensar o efeito dos colectores nas perdas de carga.

O percurso contabilizado leva em consideração as perdas devido as características hidráulicas dos tubos (rugosidade) e às eventuais perdas localizadas no sistema. A rugosidade dos tubos depende do material utilizado. Neste trabalho foram estudadas duas hipóteses para os tubos do permutador ar-terra, tubos em poliestireno de alta densidade (PEAD) e tubos de grés vitrificado, para o PEAD foi utilizada uma rugosidade de 0,0015 [mm] e para o grés vitrificado 0,04 [mm] [47].

⁴ Coeficiente de Performance – Coefficient of Performance

⁵ Rácio de Eficiência Energética – Energy Efficiency Ratio

As expressões utilizadas são descritas na continuação, começando com a potência do ventilador na expressão (41)

$$\dot{W}_e = \dot{V}(\Delta P_{perm} + \Delta P_{edif}) \quad (41)$$

Em que ΔP_{perm} são as perdas de carga no permutador e ΔP_{edif} as perdas na rede de distribuição de ar no edifício. Esta última depende da configuração específica da rede de insuflação. Para efeitos de cálculo e segundo valores de prática corrente foi posta a hipótese de uma perda de 220 [Pa], logicamente, nos casos de aplicação prática devem ser considerados os cálculos necessários para uma rede de distribuição de ar completamente definida. No caso do permutador as perdas de cargas calculam-se segundo a equação (42).

$$\Delta P_{perm} = \frac{\rho v_{ar}^2}{2} \left(f \frac{l}{d_{in}} + \sum k_{local} \right) \quad (42)$$

Em que “f” é o factor de atrito que depende da rugosidade do tubo, k_{local} são os acidentes de percurso que geram perdas localizadas, “l” e “d” são respectivamente o comprimento e diâmetro interior dos tubos enterrados. Por sua vez “f” é obtido da equação (43)

$$f = 0,25 \left[\log \left(\frac{\frac{rug_{tubo}}{d_{in}}}{3,7} + \frac{5,74}{(Re + 1)^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (43)$$

As perdas de carga existentes no permutador são bastante reduzidas, uma vez que os tubos são rectos e que podem representar uma perda de 9 [Pa] para uma velocidade de 3,5 [m/s]. Um termo importante é as perdas localizadas e que se podem estimar nas seguintes perdas:

- Compressão súbita: 0,42
- Expansão súbita: 1

Cabe destacar que as perdas indicadas são para um único tubo, tais devem ser multiplicadas pelo número total de tubos do permutador.

Para a determinação da potência do ventilador há que considerar o rendimento do ventilador η_{vent} , admitido normalmente um valor de 60%. Com este factor final pode ser conhecida a potência consumida pelo sistema, eq. (44)

$$\dot{W}_e = \dot{V} \cdot \Delta P \cdot \eta_{vent} \quad (44)$$

3.6.2. *Potência do Permutador e COP*

Para obter a potência do permutador basta calcular a quantidade de calor cedida pelo ar segundo a expressão (45).

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar} C_{p_{ar}} (T_{out} - T_{in}) \quad (45)$$

Em que as temperaturas envolvidas são as temperaturas do ar à saída e entrada do permutador.

Por uma questão de eficiência energética a potência é nula quando o sistema opta por fazer bypass ao permutador e admitir ar vindo directamente do exterior.

Finalmente, o COP e o EER do permutador, pode ser dado pelas expressões (46) e respectivamente.

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}_e} \quad (46)$$

$$EER = 3,412 \frac{\dot{Q}}{\dot{W}_e} \quad (47)$$

Capítulo 4

Validação e Escolha do Modelo

Modelo Analítico

Modelo Discreto

Seleccção do Modelo Numérico

4. VALIDAÇÃO E ESCOLHA DO MODELO

Resumo do Capítulo

Neste capítulo são validados os modelos descritos em capítulos anteriores, nomeadamente, o modelo analítico monodimensional e o modelos discretos mono e bidimensionais. Os três modelos numéricos são comparados para seleccionar o mais conveniente deles para a aplicação no caso de estudo.

A forma por excelência de legitimar os modelos computacionais é a confrontação dos resultados com valores experimentais. Os modelos experimentais medem a realidade do fenómeno, ou problema, em estudo face todas as condicionantes que a implementação prática impõe, estes valores quando correctamente obtidos são a referência do modelo computacional desenvolvido, quanto mais próximos estiverem os resultados deste da referência melhor, pois simula a realidade com menor erro.

O problema em estudo foi abordado com três modelos diferentes que foram apresentados nos subcapítulos 3.4 e 3.5, nomeadamente um modelo analítico e dois modelos discretos (mono e bidimensionais). Perante os resultados que este capítulo apresenta é considerada a adaptabilidade de cada modelo para a aplicação no caso de estudo e em consequência é seleccionado o que revele o melhor comportamento dentro das características mencionadas no tópico 3.2.2

Quando não há possibilidade de criar um modelo experimental a validação das simulações deve proceder-se com recurso aos resultados experimentais existentes na bibliografia. Outra forma é utilizar modelos comprovados cujos que sirvam de base para efectuar a validação.

Os resultados obtidos nos modelos produzidos, tanto no modelo analítico como no discreto, foram validados com base nos resultados apresentados nos artigos [7-9], alguns gráficos incluídos nestes artigos foram confrontados com gráficos próprios.

4.1. Modelo Analítico

Para validar o modelo analítico foram utilizadas três situações apresentadas no artigo de Cucumo, *et al* [7], que representam o perfil de temperaturas do solo para um instante fixo. As

Validação e Escolha do Modelo

Figuras 28 e 29 podem ser facilmente comparadas com as referências correspondentes para verificar a proximidade dos resultados.

O primeiro caso estudado considera um tubo de 0,15 [m] de diâmetro a 2 [m] de profundidade com um caudal de circulação $\dot{m} = 0,067 \left[\frac{kg}{s} \right]$, a condutibilidade do meio foi de $2 \left[\frac{W}{mK} \right]$ e constava de uma difusibilidade térmica de $1,0 \cdot 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$. Os outros parâmetros necessários para a simulação estão listados de seguida:

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| - $T_{s,y} = 15^\circ C$ | - $\Delta T_{a,d} = 9^\circ C$ |
| - $\Delta T_{s,y} = 9^\circ C$ | - $t_1 = 7h$ |
| - $\Delta T_{s,d} = 3^\circ C$ | - $t = t_a^* = 15h$ |
| - $T_{a,d} = 21^\circ C$ | - $t_s^* = 16h$ |

Os gráficos são apresentados lado a lado para se poder verificar facilmente a proximidade dos resultados. Um exemplo de utilização fica registado no primeiro par de gráficos.

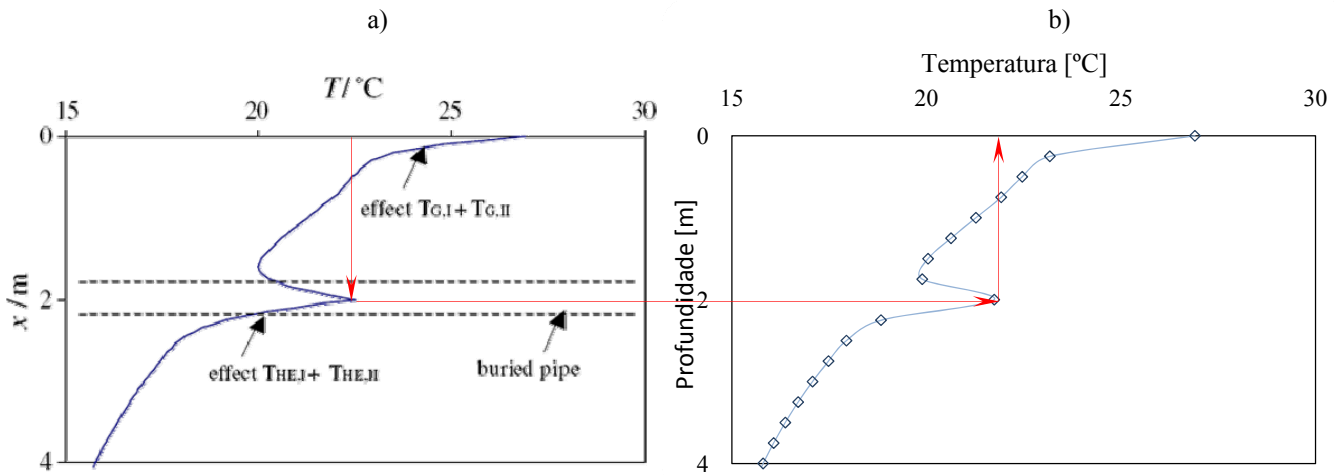


Figura 28- Perfil de temperaturas: a) Resultados de referência b) Resultado do modelo desenvolvido

A segunda simulação foi efectuada com um tubo de 0,53 [m] de diâmetro a 6 [m] de profundidade com um caudal de circulação $\dot{m} = 1 \left[\frac{kg}{s} \right]$, a condutibilidade do meio foi de $2 \left[\frac{W}{mK} \right]$ e constava de uma difusibilidade térmica de $1,3 \cdot 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$. Os outros parâmetros necessários para a simulação estão listados de seguida:

$$- T_{s,y} = 16^{\circ}\text{C}$$

$$- \Delta T_{s,y} = 9^{\circ}\text{C}$$

$$- \Delta T_{s,d} = 3^{\circ}\text{C}$$

$$- T_{a,d} = 21^{\circ}\text{C}$$

$$- \Delta T_{a,d} = 9^{\circ}\text{C}$$

$$- t_1 = 7h$$

$$- t = t_a^* = 15h$$

$$- t_s^* = 16h$$

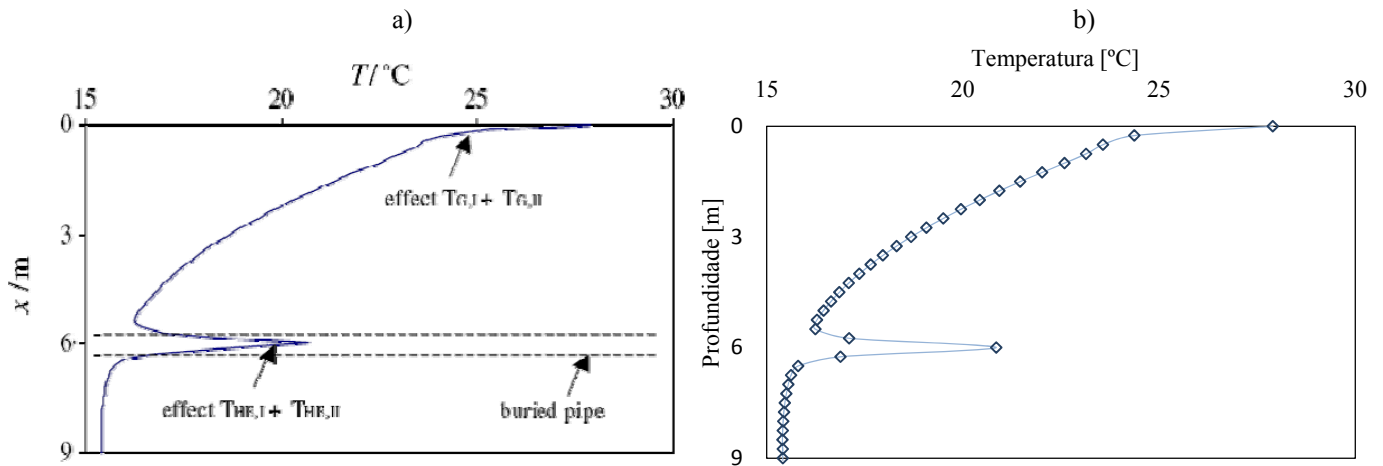


Figura 29- Perfil de temperaturas: a) Resultados de referência b) Resultado do modelo desenvolvido

Finalmente foram comparados os valores da temperatura de saída do ar para 24 situações diferentes. Os resultados foram obtidos para vários caudais de ar, profundidade do tubo e médias diárias da temperatura ambiente, as restantes variáveis do programa foram mantidas constantes em todas as simulações. A Figura 30 a comparação revelando a tendência dos modelos, isto é, o comportamento dos mesmos com a evolução da temperatura.

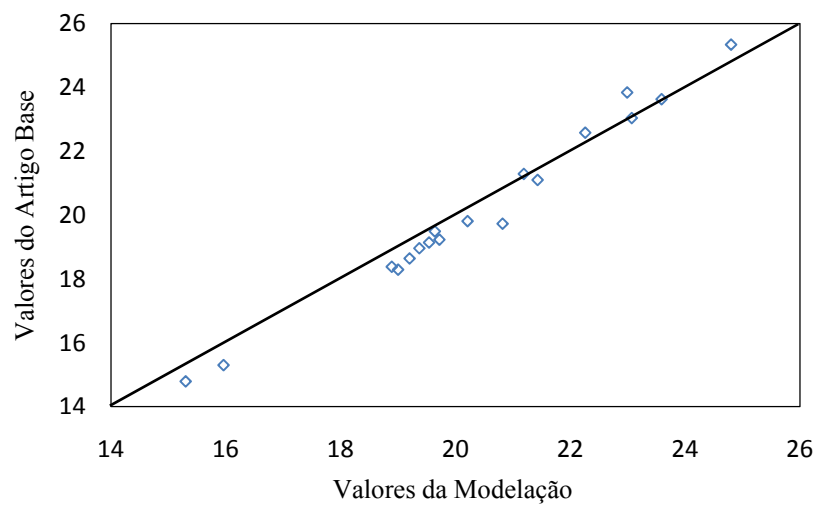


Figura 30- Comparação da temperatura de saída do permutador

É importante frisar que a função deste modelo é estudar instantes de tempo discretos e não simulações ao longo do tempo e por períodos longos, visto que os parâmetros de aproximação da temperatura ambiente podem ser melhor ajustados quando analisados períodos curtos.

4.2. Modelo Discreto

O modelo discreto apresentado neste trabalho é o resultado da combinação de vários artigos sobre permutadores ar-terra [8, 9] e comportamento térmico do solo [25]. As técnicas utilizadas são características comuns em todos os trabalhos e também encontram-se inseridas no programa desta tese. No entanto, nenhuma das bibliografias abrange a totalidade do sistema proposto, como já foi referido no capítulo 0, o permutador aqui considerado possui várias camadas enquanto os considerados nos artigos de base possuem uma única camada com tubos.

Para validar o modelo discreto foi reduzido o código base para um único patamar de tubos e obteve-se o perfil de temperaturas que o solo adquiriu para as condições impostas pelo artigo de Viorel Badescu [8]. A simulação foi realizada com os dados climáticos de Chemnitz – Saxony, para um período de simulação de um ano começando em Janeiro e com um intervalo de tempo de integração de 1800 [s]. O permutador foi simulado a uma profundidade de 2 [m], com um comprimento total de 44 [m] e as seguintes propriedades do solo:

$$- \lambda_{solo} = 1,2 \frac{W}{mK}$$

$$- c_{p_{solo}} = 2200 \frac{J}{kgK}$$

$$- \rho_{solo} = 1800 \frac{kg}{m^3}$$

$$- T_{inicial} = 10^{\circ}C \text{ (uniforme para todo o solo)}$$

$$- f = 0,4$$

$$- \alpha_{solo} = 0,8$$

Foram comparadas as evoluções da temperatura do solo a diferentes profundidades bem como o fluxo de calor transferido pelo permutador ao longo do ano. Com base no modelo discreto monodimensional desenvolvido neste trabalho, tentou-se avaliar o perfil das temperaturas do solo não perturbado tendo-se considerado para o efeito a ausência do permutador, atribuiu-se um caudal de ar nulo para que não influenciasse o perfil térmico do solo, Figura 31.

Constatou-se uma variação máxima de 2 [°C] entre o modelo desenvolvido e a referência [8] para a profundidade de 1 [m], e que esta diferença diminui com o aumento da profundidade.

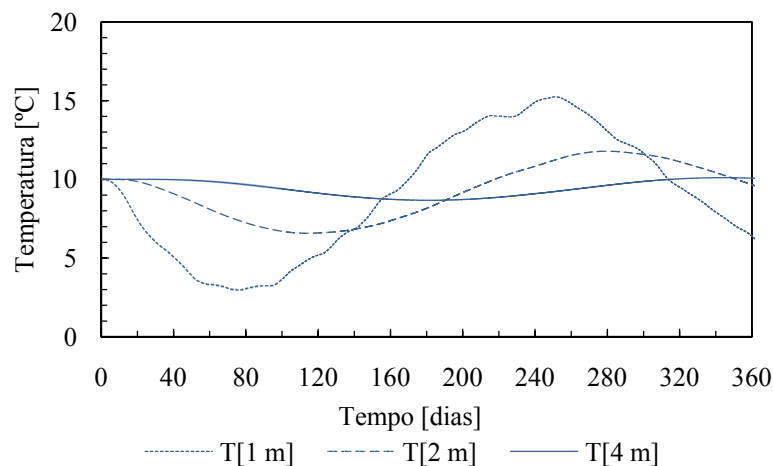


Figura 31- Evolução da temperatura para várias profundidades

Quanto ao desempenho do permutador, este foi verificado com base na potência do permutador, Figura 33, e na diferença de temperaturas entre a entrada e saída do mesmo, Figura 35. Tais valores podem ser comparados com os obtidos por Viorel Badescu [8] nas Figuras 32 e 34.

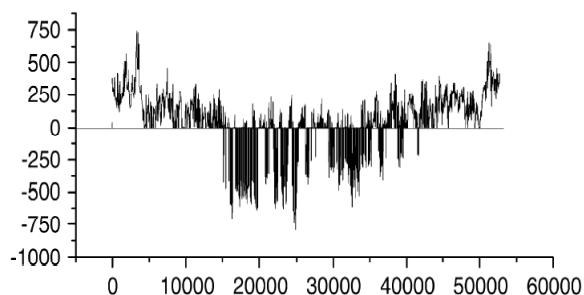


Figura 32- Potência do permutador do modelo de Badescu

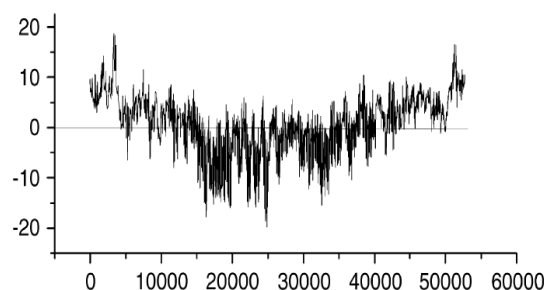


Figura 34- ΔT entre a entrada e a saída do permutador do modelo de Badescu

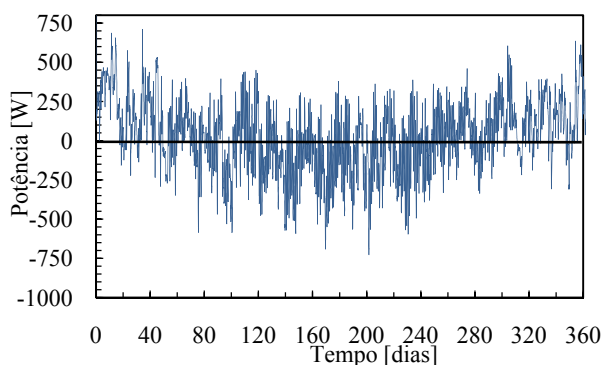


Figura 33- Potência do permutador em funcionamento permanente

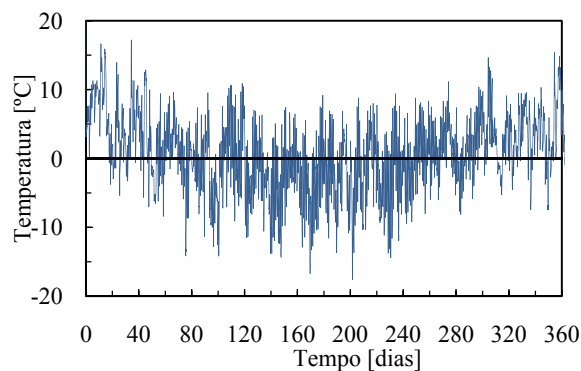


Figura 35- Gradiente de temperaturas entre a entrada e a saída do permutador

Correspondendo às expectativas o permutador possui um comportamento semelhante ao do modelo base, em que o fluxo de calor, do ar para o solo, é superior no período de arrefecimento ao fluxo de calor, do solo para o ar, na temporada de aquecimento. A potência do permutador ao longo do ano oscilam entre os ± 750 [W], tanto no modelo desenvolvido neste trabalho como no modelo de referência, sendo que na maior parte do ano não ultrapassa os 300 [W]. O mesmo se verifica com o gradiente de temperatura entre a entrada e a saída do permutador, atingindo valores máximos perto dos 20 [°C] e na média gradientes de 10 [°C].

Como já foi referido anteriormente e, em trabalhos anteriores foi desenvolvida a capacidade do permutador possuir várias camadas de tubos. Admite-se que o modelo com esta constituição seja análoga à configuração de uma camada de tubos enterrados, visto que não apresenta, em termos de princípios de formulação, nenhuma diferença significativa. Desta forma, a validação do modelo mais simples pode estender-se ao caso do modelo com múltiplas camadas de tubos.

O modelo bidimensional não é mencionado neste capítulo porque não existem dados de referência para este a não ser os já referidos antes. Neste último caso, as conclusões tiradas seriam aplicáveis porque as bases da formulação são de todo semelhantes.

Uma vez testados os modelos em condições conhecidas e estipuladas por autores de estudos anteriores, existem as condições necessárias para aplicar o trabalho desenvolvido no caso prático proposto e realizar o estudo pretendido sobre os parâmetros do sistema.

4.3. Selecção do Modelo Numérico

Atendendo a todas as considerações efectuadas até este momento é necessário seleccionar o modelo que melhor satisfaça as necessidades do caso de estudo, tais casos de aplicação requerem na prática que o modelo seja expedito e que aproxime com veracidade a realidade do problema ao longo do tempo.

Com relação ao modelo analítico lembra-se que a temperatura é aproximada por uma função “seno” simples que emite um comportamento harmónico simples. Quando períodos anuais, mensais ou até mesmo semanais são utilizados a dispersão e aleatoriedade típica dos dados climáticos produz um afastamento notório dos resultados deste modelo analítico, podendo atingir até 10 [°C] de diferença. A Figura 36 pretende demonstrar esse mesmo afastamento

comparando os resultados dos modelos desenvolvidos de uma simulação anual com o modelo analítico e com o modelo discreto.

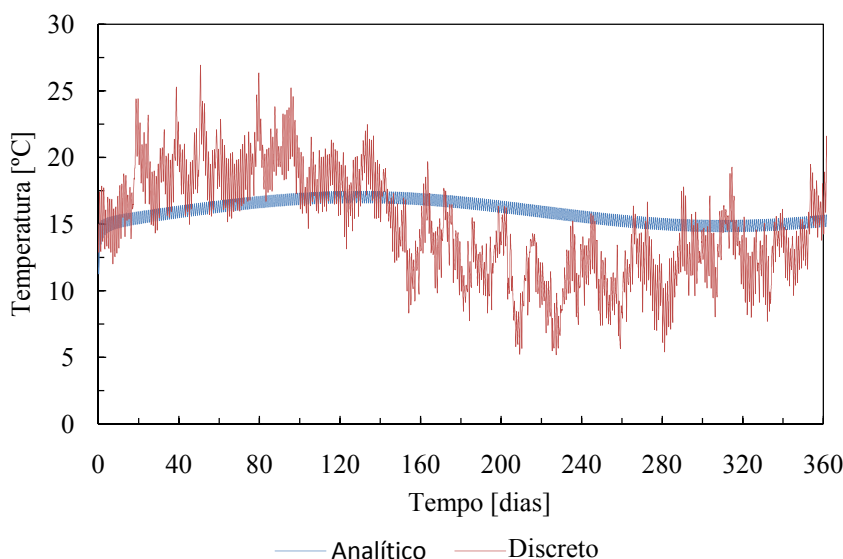


Figura 36- Temperatura de saída do permutador permanentemente ligado

Perante os resultados apresentados pode-se concluir que os modelos discretos são mais aptos para os estudos a realizar, descartando assim a hipótese do modelo analítico para as simulações do caso de estudo. Cabe agora decidir qual dos modelos discretos, mono ou bidimensional, é o mais vantajoso para este trabalho.

O modelo discreto monodimensional traduz melhor as oscilações do clima e possui uma aproximação mais realista do comportamento da superfície do solo, assim como no caso do modelo bidimensional. No entanto, o tempo de cálculo do modelo monodimensional é seis vezes menor do que no bidimensional, isto permite que o modelo apresente respostas realistas e, ao mesmo tempo, mais rápidas de casos práticos.

Quando comparados os resultados de uma simulação diária, com os modelos mono e bidimensional, verificam-se variações médias de 6,5% na temperatura de saída do permutador, em termos absolutos representam diferenças de aproximadamente 1 [°C]. Nas temperaturas extremas a variação dos resultados aumenta mas sem representar erros significativos, são registadas diferenças máximas de 2,5 [°C]. A Figura 37 permite observar a proximidade dos resultados obtidos em ambos modelos.

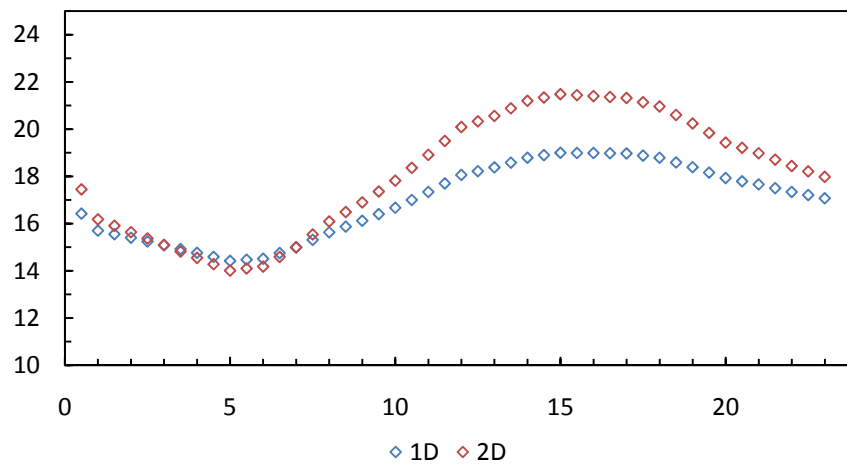


Figura 37- Comparação do modelo monodimensional e bidimensional

Tendo como base os estudos realizados sobre os diferentes modelos, concluiu-se que o modelo que apresenta as melhores características para a aplicação em problemas práticos é o modelo distribuído monodimensional, pelo que será o modelo utilizado na aplicação do permutador de tubos enterrados ao caso de estudo deste trabalho

Capítulo 5

Estudo Paramétrico

Clima

Tipo de Solo

Número de Camadas de Tubos

Profundidade e Espaçamento Entre Camadas

Diâmetro dos Tubos

Velocidade de Escoamento

Comprimento

Número de Tubos

5. ESTUDO PARAMÉTRICO

Resumo do Capítulo

Com o objectivo de otimizar o sistema, apresenta-se a influência dos principais parâmetros envolvidos no desempenho do mesmo.

Ao longo dos capítulos anteriores foram definidos múltiplos parâmetros que intervêm no funcionamento do sistema, estes foram incluídos nos modelos elaborados e em especial no modelo monodimensional, que é alvo específico do estudo a realizar neste capítulo. Cada parâmetro do modelo ocupa o seu papel e tem sua relativa importância no modelo, no entanto, espera-se que algumas variáveis específicas sejam de maior influência no comportamento do sistema.

O estudo paramétrico tem por objectivo analisar o grau de sensibilidade do modelo perante determinados parâmetros e é de grande relevância para o sistema. Neste trabalho, as variáveis comuns de análise são: a temperatura de saída e a potência do permutador, sendo os parâmetros com grande impacto e no desempenho do sistema os seguintes:

- Clima
- Tipo de solo
- Número de camadas de tubos
- Profundidade
- Diâmetro dos tubos
- Comprimentos dos tubos
- Número de tubos
- Velocidade de escoamento

As simulações efectuadas para o estudo de cada variável foram, em primeiro lugar, efectuadas para um dado instante de tempo (dia médio do mês de Julho⁶) no qual se pode observar as variações da temperatura à saída do permutador para os diferentes valores dos parâmetros

⁶ Considerou-se este mês como representativo do período de arrefecimento.

analizados. Em segundo lugar, pretendeu-se avaliar o desempenho do sistema ao longo do tempo para as várias das soluções adoptadas.

Cabe ainda mencionar que, embora o sistema possua um programa de controlo que evita que o permutador esteja constantemente em funcionamento, os estudos apresentados referem-se a instantes de funcionamento nominal do permutador e a períodos de funcionamento sem o controlo mencionado, isto é, em funcionamento contínuo.

A menos que alguns dos parâmetros seja alvo de estudo, foram definidas para todas as simulações condições comuns e que são os seguintes:

Localidade: Porto	Profundidade:
Solo: Granítico	Y=4 [m]; E=2 [m]
Caudal: 120 [m ³ /h]	Comprimento: 35 [m]
Número de tubos: 2	Porosidade do solo: 40%
Diâmetro dos Tubos: 0,1 [m]	Humidade do solo: 60%

5.1. Clima

As condições climáticas de cada localidade têm uma forte influência no desempenho do permutador. Zonas de temperaturas muito elevadas podem levar a saturar o solo com certa rapidez, assim como climas com oscilações elevadas podem colocar o permutador a funcionar de forma altamente instável.

O clima foi avaliado partindo de dois efeitos possíveis. Em primeiro lugar, com uma simulação do permutador em regime permanente para se poder observar como a inércia do solo se manifesta em climas diferentes em que os resultados obtidos são apresentados, todos eles, em função da temperatura do ar à saída do permutador. Numa segunda fase, foi efectuada uma simulação com o sistema de controlo activado, permitindo que o permutador funcionasse só quando as condições do ar exterior fossem piores que as produzidas pelo permutador e, neste caso, a potência do permutador é utilizada para a avaliação do desempenho do sistema

As localizações escolhidas para realizar as simulações foram Porto, Lisboa e Faro, mas para facilitar a visualização dos resultados, são apresentadas as comparações entre as duas primeiras cidades (Figura 38). O Porto possui temperaturas mais baixas do que Lisboa durante o ano inteiro, em complemento a temperatura do solo é aproximada à uma média anual da temperatura ambiente para as profundidades analisadas. De uma forma geral, pode-se concluir que a amplitude térmica entre o solo e o ar é maior, no verão, em Lisboa e, no inverno, no Porto.

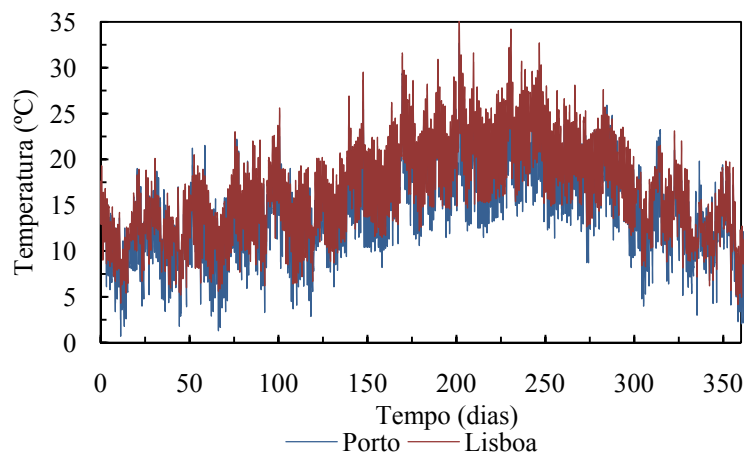


Figura 38- Temperatura ambiente do Porto e Lisboa

Após simulações verifica-se que devido a inércia do solo a temperatura do ar à saída do permutador é “amortecida”, quer dizer que enquanto a amplitude da temperatura ambiente é de, aproximadamente, 30 [°C]. O ar no permutador tem uma amplitude de 15 [°C]. Ainda, atendendo a que a simulação foi feita para um permutador permanentemente ligado, existe um atraso no tempo de, aproximadamente, um mês da temperatura de saída do permutador e o ambiente, tal como se apresenta na Figura 39.

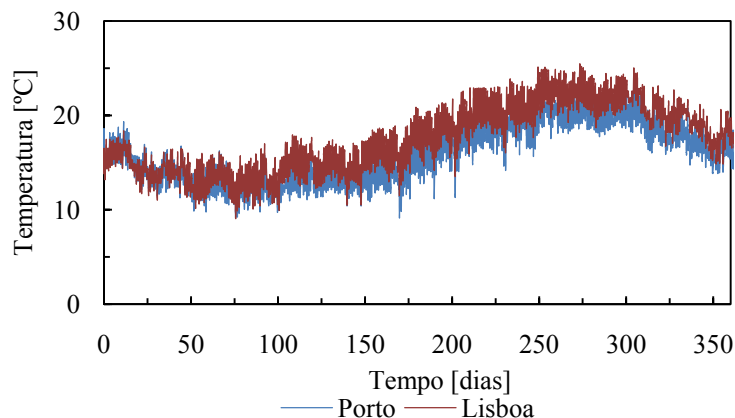


Figura 39- Temperatura de saída do permutador

A diferença de temperaturas é considerada o motor da transferência de calor, por isso, a potência do permutador será maior nas localidades, e alturas, em que tal diferença é maior. Com base nesta constatação e, como era de esperar, das duas localidades estudadas, a potência do permutador é maior, no verão, em Lisboa e, no inverno, no Porto (Figura 40).

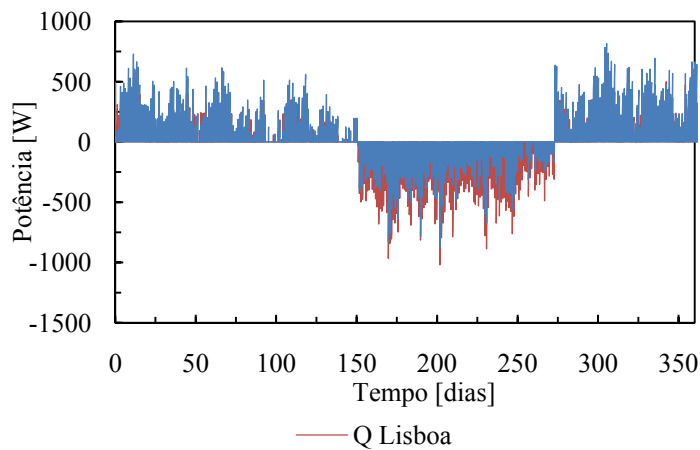


Figura 40- Potência do permutador no Porto e Lisboa

No entanto, quando comparados as Figuras 39 e 40 conclui-se que potências superiores em diferentes climas não correspondem necessariamente a temperaturas mais baixas, no verão, ou mais altas, no inverno. Por este motivo cada localidade deve ser estudada como um caso independente e único, pode ocorrer situações em que, mesmo tendo melhores desempenhos, seja necessário implementar permutadores com maiores atravancamentos, ou seja, tubos com maior comprimento ou maior número de tubos.

5.2. Tipo de Solo

Conforme analisado no Capítulo 2, o solo possui constituições muito variadas, seus minerais base dependem das zonas geográficas em estudo e as suas propriedades térmicas variam consideravelmente. O solo depende fortemente da porosidade, e humidade, e estas influenciam de forma notória a condutibilidade e capacidade térmica do solo.

A análise paramétrica do tipo de solo concentra-se em avaliar valores limites deste atendendo a que qualquer valor intermédio produzirá resultados intermédios.

No âmbito industrial, para a implementação de “buried pipes”, duas soluções são frequentemente adoptadas. Uma delas consiste em aproveitar a terra retirada do terreno aquando da escavação para cobrir os tubos e, neste caso, as propriedades do solo

correspondem às do solo local. A outra hipótese é criar o tipo de solo desejado para enterrar os tubos do permutador, os solos serão transportados de outras localidades. O solo, em ambos casos, pode ser compactado à medida que se colocam as camadas de terra sobre os tubos de forma a reduzir a porosidade e melhorar as características.

Os tipos de solos escolhidos para avaliar a influência deste parâmetro pretendem simular estas duas situações. Os resultados apresentados de seguida (Figura 41) correspondem a um solo de areia, plausível de ser fabricado, e a um solo calcário típico de Lisboa.

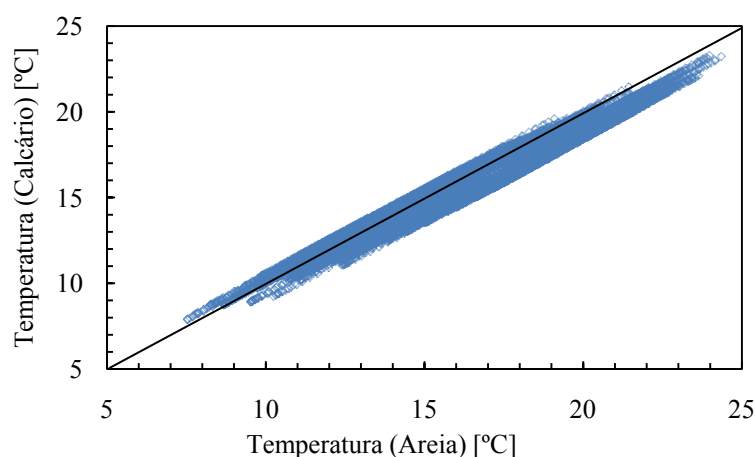


Figura 41- Comparação dos solos de areia e calcário

Como se pode observar os resultados são bastante próximos apesar de serem solos diferentes. A condutibilidade térmica de cada tipo de solo difere de mais de 3 [W/m·K], mas mesmo com diferenças acentuadas deste tipo, os seus efeitos não são notórios no comportamento do permutador, ou seja, do sistema de tubos enterrados.

Em contraste, pequenas variações da capacidade térmica do solo sentem-se mais facilmente no comportamento do permutador. O solo arenoso possui uma capacidade térmica inferior à do solo calcário, em aproximadamente 50 [J/kg·K], por este motivo, o solo arenoso satura mais rapidamente e as temperaturas tendem a ser mais elevadas, tornando-se assim um solo com piores características para o desempenho do permutador. Tudo isto indica que a propriedade que governa o comportamento térmico do solo é a capacidade térmica e não a condutibilidade.

No geral, as propriedades da água fazem com que as propriedades térmicas dos solos sejam muito parecidas. No entanto, cabe salientar que para solos secos a composição mineral tem maior peso no comportamento dos mesmos. Na maioria do território nacional é preferível aproveitar o solo nativo em vez de produzir um solo arenoso. Só no caso do Porto é que,

dependendo dos custos envolvidos, criar um tipo de solo diferente ao do granítico pode ser vantajoso.

5.3. Número de Camadas de Tubos

Os estudos realizados sobre a influência do número de camadas de tubos sobre o desempenho do permutador mostram que, mantendo áreas de transferência e velocidades equivalentes, os permutadores de dois e três andares podem perder respectivamente perto de 3 e 6% da potência.

A Figura 42 esclarece o motivo desta perda de potência, esta é relativa ao permutador de três camadas mas as conclusões obtidas verificam-se também para o de duas camadas. Os tubos encontram-se representados nesta figura da seguinte forma:

Camada 1 = 4 [m]

Camada 2 = 6 [m]

Camada 3 = 8 [m]

As camadas são identificadas pela quebra no andamento do perfil de temperaturas. Como se pode observar, o solo atinge patamares de temperaturas diferentes nas três camadas do permutador, o solo entre as camadas de tubos 2 e 3 adquire temperaturas mais elevadas do que atingiria se fosse um único tubo. Desta forma reduz-se o gradiente de temperaturas entre o ar e o solo e, em consequência, a apetência do solo para absorver o calor do ar.

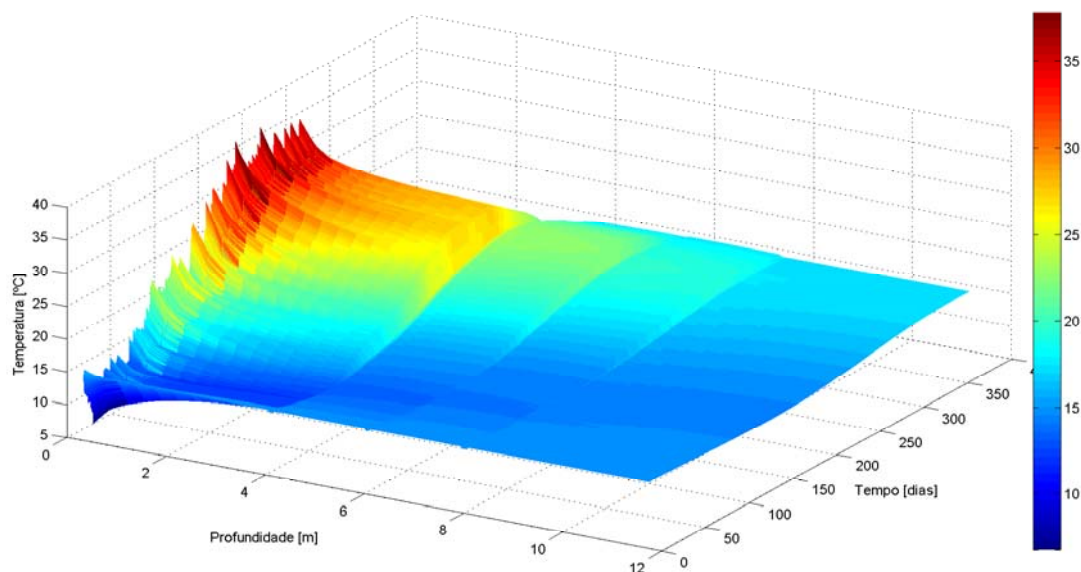


Figura 42- Perfil de temperaturas do solo com um permutador de três andares

Em contrapartida a redução da potência vem acompanhada de uma redução da área horizontal de instalação de 50%, no caso de dois andares e 67% no de três. As potências obtidas pelo permutador de um andar podem ser obtidas pelas outras configurações, para isso basta aumentar o espaçamento entre tubos e os caudais circulados. Por exemplo, se no permutador de três camadas se mantiver o mesmo número de tubos por andar que no permutador simples, e conservando ainda a mesma velocidade de escoamento, a potência do permutador aumenta três vezes mais que a do permutador de um andar. Ainda, como os andares inferiores estão mais afastados da superfície do solo as temperaturas de saída mantêm-se durante mais tempo.

Comparando as três possíveis configurações dos tubos enterrados conclui-se, à partida, que apesar de o aumento dos andares implicar uma pequena perda de potência, esta é compensada com a redução da área de ocupação.

5.4. Profundidade e Espaçamento Entre Camadas

A profundidade a que se encontram os tubos do permutador é um dos parâmetros de maior importância para a implementação desta tecnologia. Permite saber à partida, se existe espaço disponível para a instalação do sistema e se os custos são suportáveis, pois grande parte do investimento é absorvido pelos custos de escavação, no fundo, custos de investimento versus retorno de benefícios (poupança energética).

Como referido anteriormente, os efeitos da temperatura ambiente deixam de manifestar-se no solo não perturbado a partir de um metro de profundidade. Para distâncias iguais, ou superiores, a estas a temperatura do solo é praticamente constante ao longo do ano. No entanto, tal facto pode não se verificar se o solo for alterado por um permutador ar-terra ou outro equipamento estranho ao solo.

Para estudar a profundidade dos tubos, como parâmetro de análise, avaliaram-se em separado as variáveis “Y” (profundidade do primeiro tubo) e “E” (espaçamento entre camadas) fixando uma delas e variando a outra. Em primeira instância, a Figura 43 representa a análise da variação de “Y”.

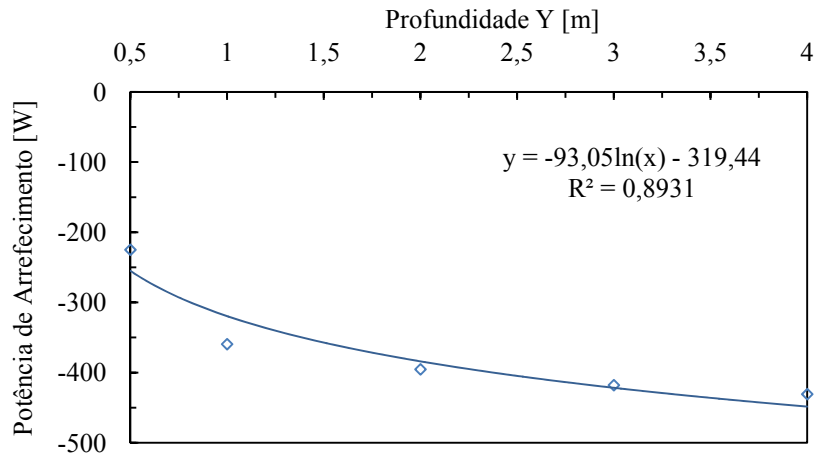


Figura 43- Variação da potência média de arrefecimento com a profundidade

A temperatura do solo é o que limita da quantidade de calor transferida e se esta se aproximar muito da temperatura ambiente, como no caso das baixas profundidades, a potência do permutador tenderá para zero. Com o aumento da profundidade a temperatura tende a manter-se constante e a afastar-se dos valores ambiente, tendo como resultado a potência estabilizada em valores máximos para as condições específicas de funcionamento. Os resultados da análise da variável “Y”, apresentados na Figura 43, apresentam uma evolução logarítmica da potência média de arrefecimento, a linha de tendência utilizada no gráfico permite observar que, próximo dos 3 [m], os valores aproximados pela função logarítmica aumentam mais rapidamente que os valores da simulação. Por este motivo, pode-se admitir que, em valores médios, a potência estabiliza aos 3 [m] de profundidade e que este valor corresponde ao ponto óptimo para o período de arrefecimento.

É importante destacar que as condições óptimas oscilarão ao longo do tempo, afastando-se do valor inicial, principalmente, na época de aquecimento. No entanto, como o principal funcionamento do permutador ar-terra é como sistema de apoio ao arrefecimento, é prioritário dimensionar a profundidade das camadas para o período correspondente.

Com a Figura 44 pretende-se apresentar a variabilidade do perfil de calor do solo ao longo do tempo, nela se representa o perfil de um permutador cujas camadas 1, 2 e 3 encontram-se, respectivamente, às profundidades de 3, 4,5 e 6 [m]. A Figura 44 mostra que, mesmo a uma profundidade Y=3 [m], a superfície do solo pode influenciar a potência do permutador por alterar a distribuição espacial do calor no mesmo. A cor verde, que representa o fluxo nulo, é perturbada ocasionalmente por linhas de fluxo amarelas, de maior intensidade, que se estendem até a proximidade da primeira camada de tubos.

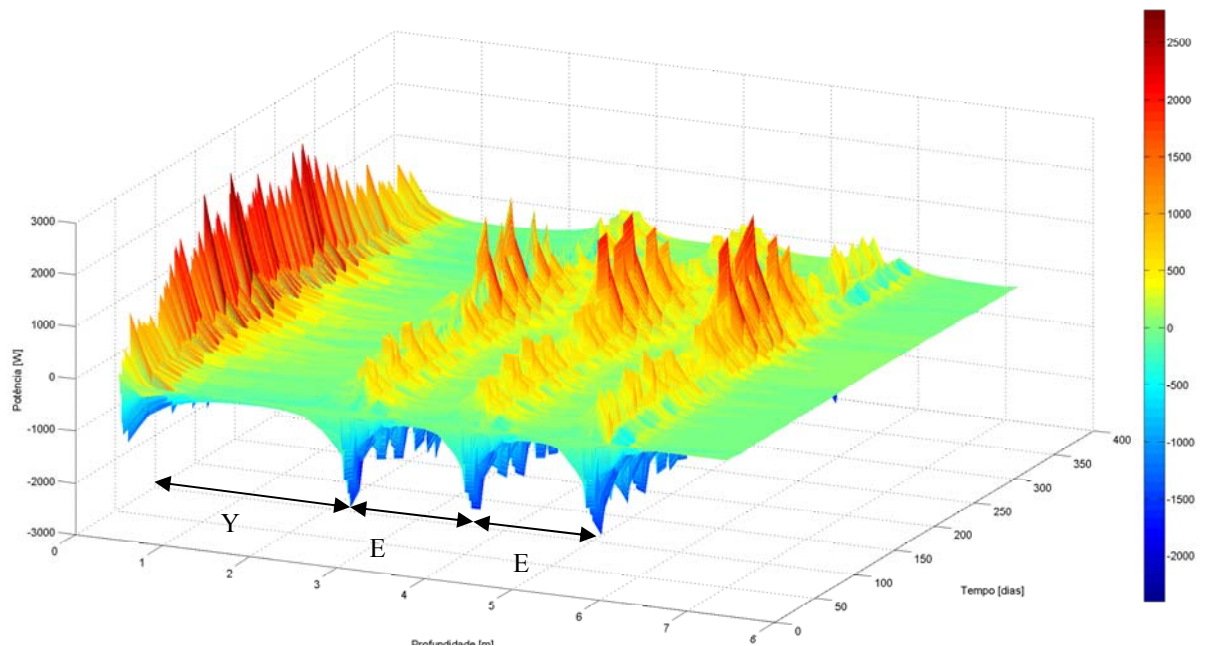


Figura 44- Evolução temporal do perfil de calor para $Y=3$ [m], $E=1,5$ [m]

No caso do espaçamento entre camadas ϵ , a influência na potência do permutador é facilmente perceptível (Figura 44). A sensibilidade do sistema a este parâmetro é impelida pela velocidade de saturação do solo. Quando o espaço entre os andares é reduzido, o solo satura mais rapidamente, a temperatura sobe vertiginosamente e fluxo de calor anula-se porque o solo atingiu seu limite de absorção de energia. Perante esta situação o ar encontra-se impossibilitado de transferir energia ao solo e a potência do permutador reduz-se. Por isso, quando se aumenta a distância entre os tubos aumenta-se, também, a potência do permutador, assim como é corroborado na análise paramétrica da variável “E” apresentada na Figura 45. Este parâmetro é analisado no instante de tempo definido no início do capítulo atendendo a que a influencia do espaçamento entre camadas é análoga à apresentada durante todo o ano.

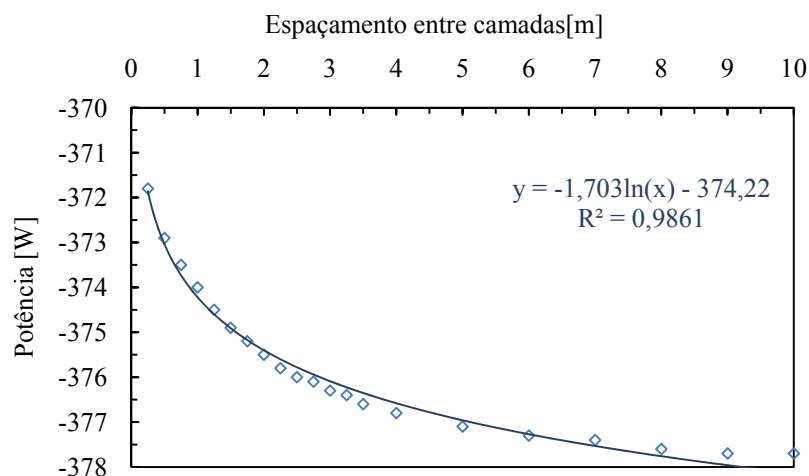


Figura 45- Evolução da potência em função do espaçamento entre andares

Esta análise paramétrica permite ter uma ideia de quais são distâncias recomendadas para o dimensionamento da profundidade de cada camada. Uma projecção da Figura 44 mostra os patamares de fluxo encontrados, principalmente nos espaços entre tubos em forma de contornos (Figura 46)

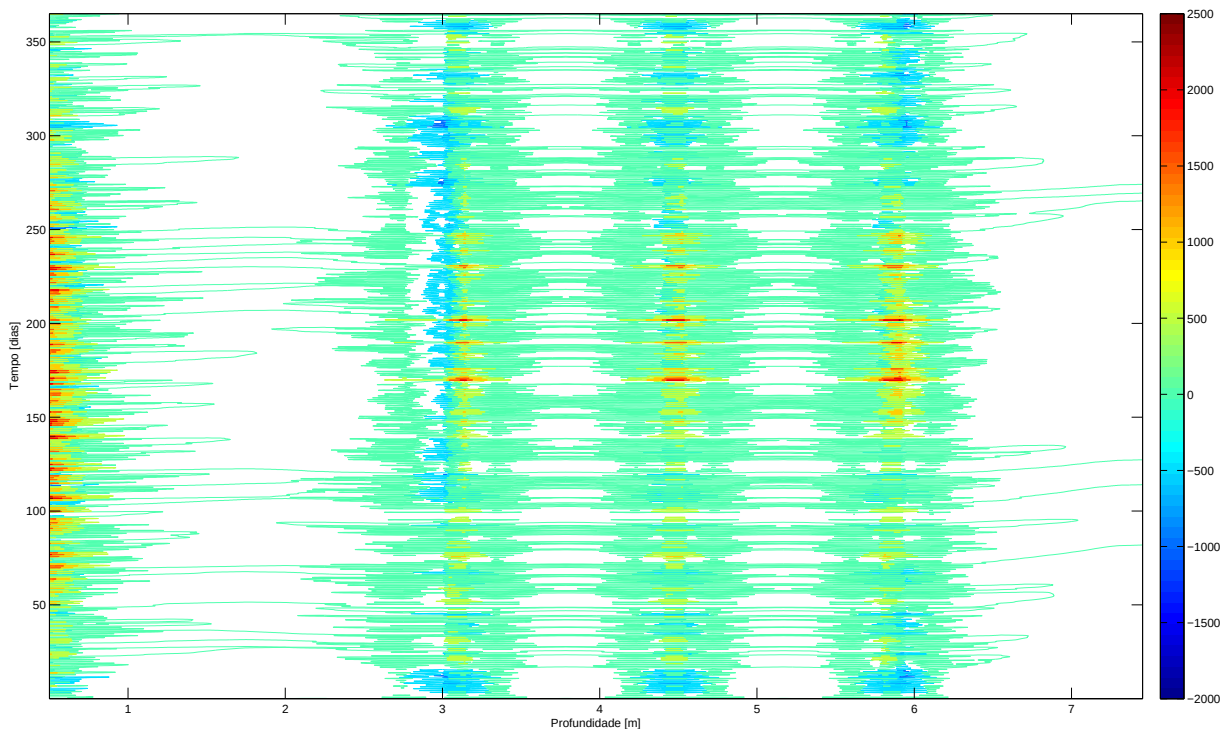


Figura 46- Isofluxo de calor em função do tempo e do espaço

As linhas de fluxo de calor acima representadas traduzem a intensidade de utilização do solo, particularmente no espaçamento entre as camadas de tubos. Observa-se que, de uma forma geral, o fluxo de calor não “explora” a totalidade do solo, o espaçamento é completamente explorado num terço da totalidade do período de simulação. No restante do tempo as linhas de isofluxo abrangem sensivelmente metade do espaço entre camadas.

Perante os resultados observados nas Figuras 45 e 46, admite-se que a solução simulada, $E=1,5$ [m], é uma boa aproximação do valor ideal do espaçamento entre camadas, podendo esta ser aumentada até os 2 [m].

5.5. Diâmetro dos Tubos

Os valores adoptados para o diâmetro das tubagens foram definidos atendendo à existência do produto no mercado. As duas soluções consideradas para o tipo de tubo a implementar foram:

- Tubos PEAD (Polietileno de Alta Densidade)
- Tubo de grés vitrificado. (Típico na indústria portuguesa do século XX para as canalizações e esgotos)

O diâmetro dos tubos de PEAD varia desde 16 [mm] até 1200 [mm], no entanto, para este tipo de aplicações não se recomenda a utilização de grandes diâmetros deste material devido à possibilidade do tubo deformar com o peso resultante da carga do solo. Os valores utilizados foram recolhidos dos catálogos da Centralplast [49] e têm como preocupação a estabilidade mecânica associada a eficiência.

Os tubos de grés vitrificados para o efeito possuem diâmetros tipicamente maiores que os de PEAD, assim, os diâmetros escolhidos para este tipo de tubo complementam os anteriores e obtém-se uma vasta gama de valores para estudar este parâmetro. Os valores utilizados foram recolhidos dos catálogos da Keramo – Denos [50].

A Tabela VII apresenta os valores escolhidos para a análise deste parâmetro tanto para os tubos PEAD como os de grés.

Tabela VII- Diâmetro dos tubos PEAD e Grés Vitrificado

PEAD		Grés Vitrificado	
[mm]		[mm]	
16	75	100	500
20	90	150	600
25	110	200	
32	125	250	
40	140	300	
50	160	350	
63		400	

A Figura 47 apresenta claramente que a potência do permutador diminui com o aumento do diâmetro dos tubos. Estes resultados foram obtidos mantendo o caudal constante e nestas circunstâncias a velocidade do escoamento diminui com o aumento da secção de passagem. Por sua vez, a velocidade do escoamento é directamente proporcional ao coeficiente de convecção nos tubos (α_{ar}), motivo pelo qual se a velocidade diminui também o faz tal coeficiente, com a agravante que, tendo em conta a expressão (33), o coeficiente de convecção diminui cinco vezes mais que a velocidade.

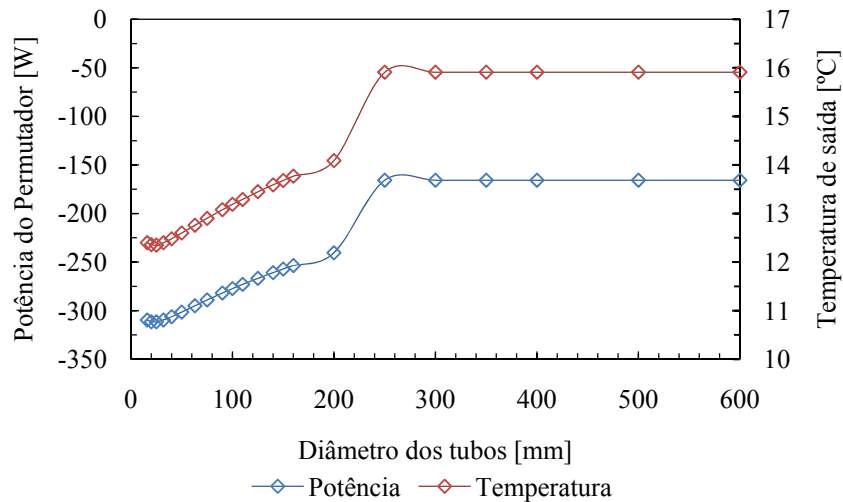


Figura 47- Análise do diâmetro dos tubos em função da potência do permutador

A Figura 47 mostra ainda uma quebra abrupta da potência do permutador, sendo justificado pela mudança do regime turbulento para o regime laminar. Neste caso o fluxo de calor por convecção diminui consideravelmente pelo que a temperatura de saída do permutador aumenta significativamente.

No entanto, por vezes pode ocorrer que aumentando o diâmetro da conduta também aumente a potência do sistema. Este facto é verdade se aumentar a dimensão do tubo e ajustando caudal para manter a velocidade constante, ou quando, para um mesmo caudal, o aumento da área de transferência de calor se sobrepõe à diminuição do coeficiente de convecção. Um exemplo deste último caso é descrito na Figura 48, que é um detalhe do gráfico anterior. O aumento dos diâmetros de 16 [mm] para 20 e 25 [mm] fizeram aumentar a potência do permutador, sendo que neste caso o aumento é ínfimo (2 a 4 [W]), mas ao se proceder conforme a primeira hipótese as variações da potência podem ser consideráveis.

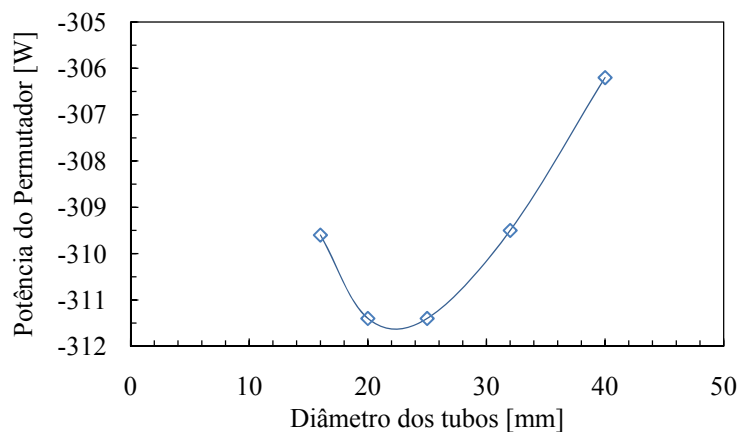


Figura 48- Efeito na potência devido ao aumento da área de transferência

Finalmente, uma nota sobre a eficiência do permutador. Sabe-se que, a quantidade de ar que realmente entra em contacto com as paredes dos tubos, face à totalidade de fluido circulado, diminui com o aumento da secção de passagem. Assim sendo, a transferência de calor não se dá, em condições óptimas, em todo o ar mobilizado existindo percentagens de ar que não trocam calor com o tubo. Este fenómeno faz com que a eficiência do sistema diminua. Também é certo que a turbulência do escoamento ameniza este efeito, no entanto, no caso de regimes laminares a eficiência do sistema pode ser afectada de forma considerável.

Uma forma de evitar este erro é manter as velocidades do escoamento elevadas, ou seja, perto de 3 a 5 [m/s] questões de ruído.

5.6. Velocidade de Escoamento

Tanto o diâmetro como a quantidade de tubos utilizados são parâmetros que alteram directamente a velocidade do escoamento. Nesta oportunidade é estudado directamente o efeito da velocidade do escoamento na potência e no EER/COP do permutador, permitindo observar mais claramente a influência desta variável. Para tal, nas simulações realizadas, manteve-se tanto o número de tubos como o diâmetro dos mesmos e variou-se a velocidade de escoamento do ar e consequentemente o caudal. Os resultados para o instante de tempo indicado no início do capítulo (12:00 de 17 de Julho) são apresentados na Figura 49.

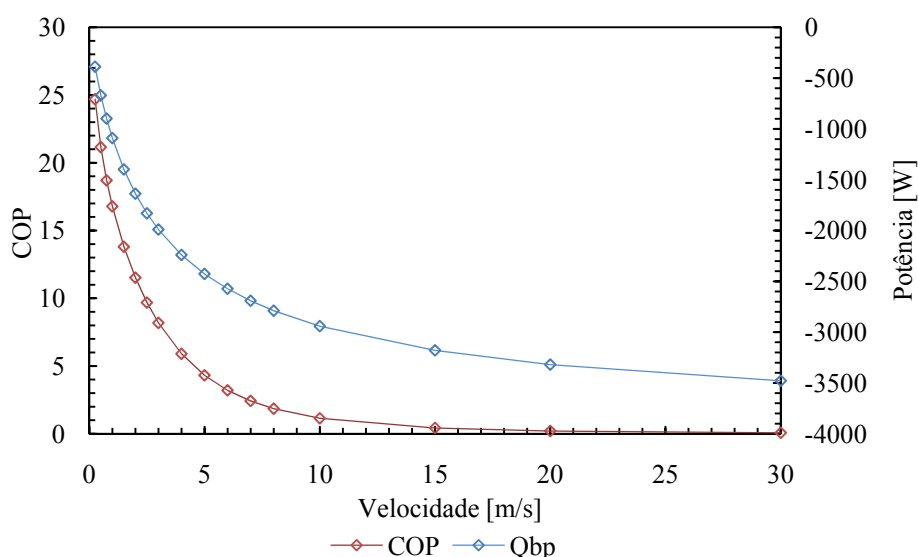


Figura 49- Influência da velocidade do escoamento

Com o aumento da velocidade aumenta a potência do permutador, no entanto este aumento tende a anular-se devido à eficiência da transferência de calor diminuir, o que faz com que o

gradiente de temperaturas tenda para zero. Por sua vez, o aumento progressivo da velocidade do escoamento diminui a eficiência na transferência de calor de tal forma que apesar de existirem velocidades elevadas a potência não aumenta. Para as condições impostas inicialmente na simulação esta condição verifica-se a partir dos 10 [m/s].

Por sua vez o rendimento do permutador diminui de forma acentuada, o EER/COP diminui com o cubo da velocidade, isto é, para um aumento do dobro da velocidade o COP diminui oito vezes. O EER/COP diminui com o aumento das perdas de carga da instalação, porque este aumento implica que o ventilador precise ter maior potência para vencer tais cargas. Ainda, a potência dissipada aumenta menos comparativamente a potência do ventilador, daí que a razão do COP diminua consideravelmente.

Ao comparar o aumento da potência do permutador devido ao aumento da área de transferência ou da velocidade, observa-se claramente que o sistema é muito mais sensível às variações da velocidade do escoamento. Por este motivo, manter a velocidade com valores elevados suficientes para maximizar a potência do permutador sem penalizar o EER/COP do mesmo deve ser uma prioridade.

5.7. Comprimento

O comprimento dos tubos do permutador é um parâmetro de extrema importância para o dimensionamento do sistema, sendo necessário para calcular a dimensão do mesmo e intervém directamente na performance do sistema.

A inércia do ar face à do solo pode ser considerada desprezável, por este motivo o efeito produzido ao circular o ar pelo permutador é sentido quase instantaneamente. O calor cedido para o solo reverte-se num abaixamento imediato da temperatura do ar circulado. A relação entre a variação da temperatura e o comprimento dos tubos, para um determinado instante de tempo, pode ser representada na Figura 50.

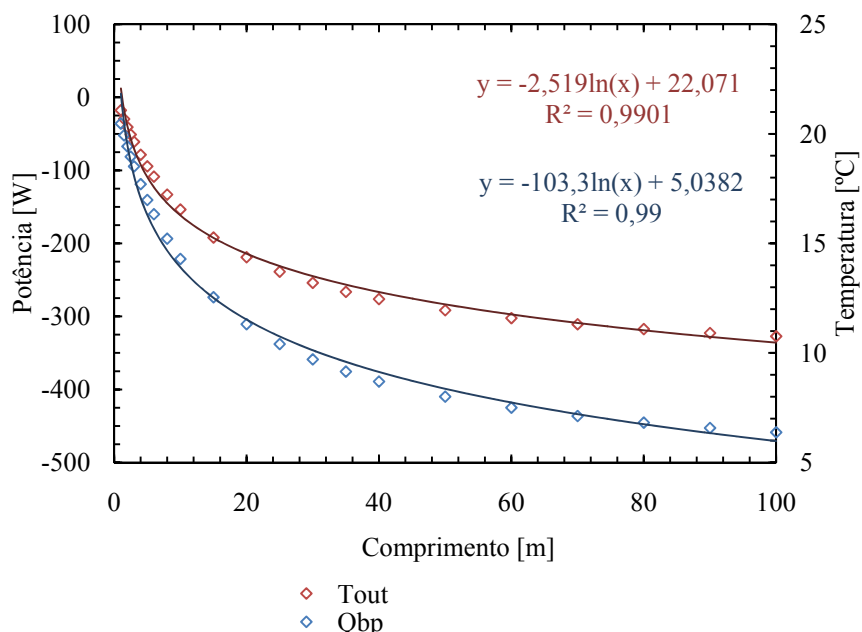


Figura 50- Evolução da temperatura e potência com o comprimento do permutador

Tal como era expectável que a temperatura do ar diminui consideravelmente com os primeiros metros de comprimento e depois sua variação desacelera com o continuo aumento do comprimento dos tubos.

Para determinar o comprimento óptimo é necessário avaliar os efeitos na eficiência do permutador com os custos envolvidos. Na generalidade dos casos, os custos do material são relativamente baixos, pelo que se pode aproveitar para optar por tubos mais compridos. Dependendo ainda das limitações geométricas do local de aplicação, os tubos podem ser escolhidos segundo as disponibilidades de cada caso. Na prática é comum recorrer-se a tubos com comprimentos que variam desde 20 [m] até 50 [m]. De forma geral depreende-se que o desempenho do permutador aumenta com o comprimento dos tubos tal como se observa na Figura 50, logo, para tirar o máximo proveito do recurso deve-se tender para o comprimento máximo possível.

No entanto, quando o factor é custo de investimento/eficiência é necessário um estudo mais detalhado para se encontrar o comprimento óptimo.

5.8. Número de Tubos

O modelo desenvolvido neste trabalho possui três camadas de tubos com igual número de tubos. A quantidade de tubos que existem por camada pode ser atribuída pelo utilizador. Este parâmetro, à semelhança do diâmetro dos tubos, influencia a velocidade do ar circulado e em consequência a transferência de calor por convecção nos tubos se o caudal se mantiver constante. No entanto, estudar esta variável é de interesse para constatar-se que a influência na potência do sistema é afectada da mesma forma, como ocorre no caso do diâmetro.

Como já foi considerado, o fluxo de calor por convecção nos canais do permutador pode ser afectado pela diferença de temperaturas, o coeficiente de convecção e a área de transferência de calor, logo depende do número de tubos. O gradiente de temperaturas neste estudo específico é igual em todas as simulações, assim pode-se isolar a sua influência no desempenho do permutador. Numa análise simplista é possível afirmar que o número de tubos actua directamente no fluxo de calor absorvido, tal como se apresenta na Figura 51.

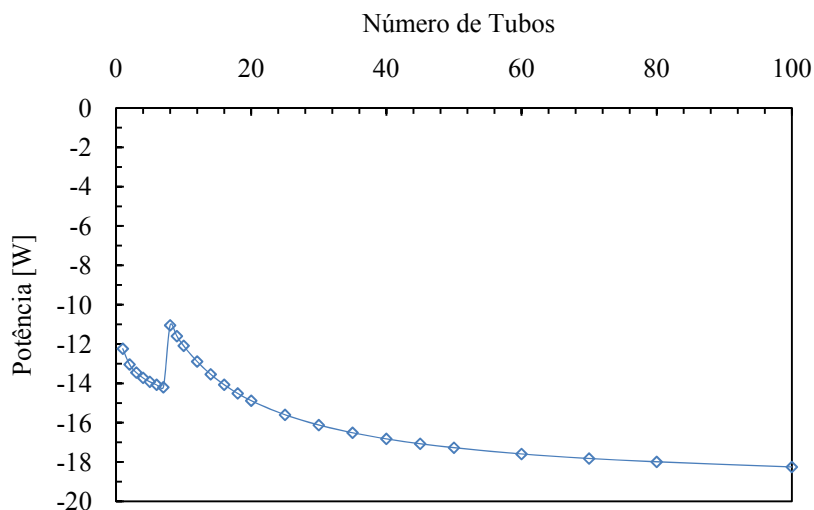


Figura 51- Evolução da temperatura e potência com o número de tubos por andar

Ao aumentar o número de tubos do permutador duas coisas contrastantes acontecem com a convecção nos tubos. Por um lado, aumenta a área de transferência de calor, que pode fazer aumentar a intensidade do fluxo de calor e por outro, reduz a velocidade do escoamento que pode fazer diminuir o fluxo de calor, pois no exemplo o caudal é constante. Como se pode observar na Figura 51 a potência do permutador aumenta, indicando assim que o factor dominante é o aumento da área de transferência e depois é superado pela redução resultante da diminuição da velocidade do escoamento.

Como a transição para o regime laminar é um problema, na Figura 52 observa-se a ocorrência da transição de regime para vários diâmetros e quantidades de tubo mantendo sempre o mesmo caudal.

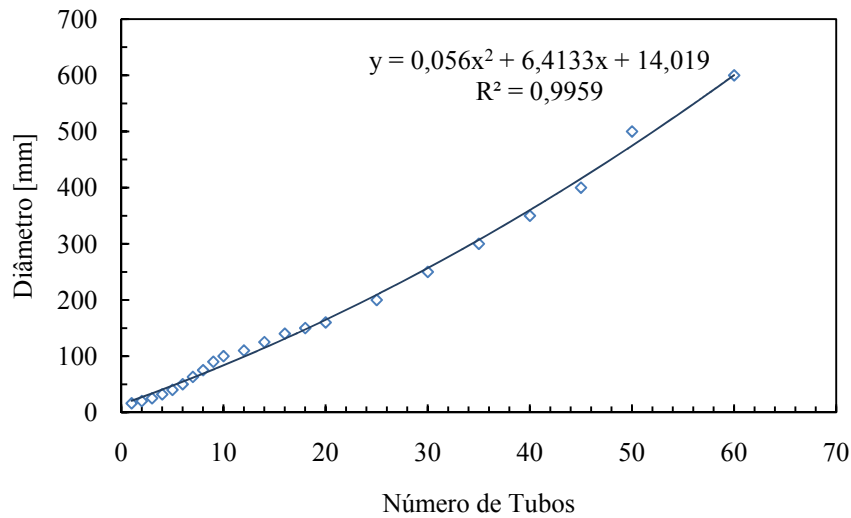


Figura 52- Transição de regime do escoamento

A relação entre a potência, o diâmetro e número de tubos é dada pela expressão (48), em que a constante resulta da combinação algébrica de todos os outros parâmetros do modelo que, para esta análise, são mantidos constantes. Esta equação é deduzida a partir das expressões (33), (35) e (40).

$$\dot{Q} = cte \cdot \sqrt[5]{d_{in}^4 \cdot N_t} \quad (48)$$

Uma vez analisados os principais parâmetros do sistema, implementou-se o modelo desenvolvido num caso prático para observar qual a interação do permutador quando acoplado a uma habitação. As conclusões obtidas neste capítulo foram aplicadas no caso de estudo para tirar o máximo proveito possível do sistema.

Capítulo 6

Integração do Permutador num Caso Prático

Descrição do Edifício

Controlo e Apoio do Sistema

6. INTEGRAÇÃO DO PERMUTADOR NUM CASO PRÁTICO

Resumo do Capítulo

Este capítulo apresenta o edifício onde vai ser implementado o permutador de tubos enterrados. Menciona as características gerais e as necessidades impostas pelo mesmo, nomeadamente caudais mínimos de insuflação e perfis de ocupação. Refere ainda como é feita a integração do permutador no edifício.

Também se faz uma breve consideração do controlo ao qual o permutador está sujeito. Destaca as condições que o sistema tem de satisfazer para funcionar de forma produtiva.

O principal objectivo do programa desenvolvido é integrar o sistema em estudo num edifício e avaliar o impacto desta solução face às soluções clássicas. Para tal, o edifício permite a admissão de ar climatizado proveniente directamente do sistema de climatização, ou então directo do exterior.

6.1. Descrição do Edifício

O caso de estudo proposto consta de um conjunto de edifícios distribuídos da forma apresentada na Figura 53, edifícios estes de cariz social e com elevada taxa de ocupação, por outro lado, com custos de investimento controlados e limitados. A implantação do complexo habitacional apresenta espaços verdes, comuns aos edifícios, que podem ser aproveitados para instalar permutadores colectivos para várias parcelas. O edifício do projecto assinalado na Figura 53 é constituído por 3 andares, um nível (rés do chão) parcialmente enterrado e dois níveis de estacionamento subterrâneos, cave e subcave. As zonas de intervenção, assinaladas a vermelho, também possuem áreas de terreno em profundidades de subcave plausíveis de admitirem um permutador ar-terra. A localização preferencial dos permutadores, por questões técnicas de instalação, é nas zonas verdes.

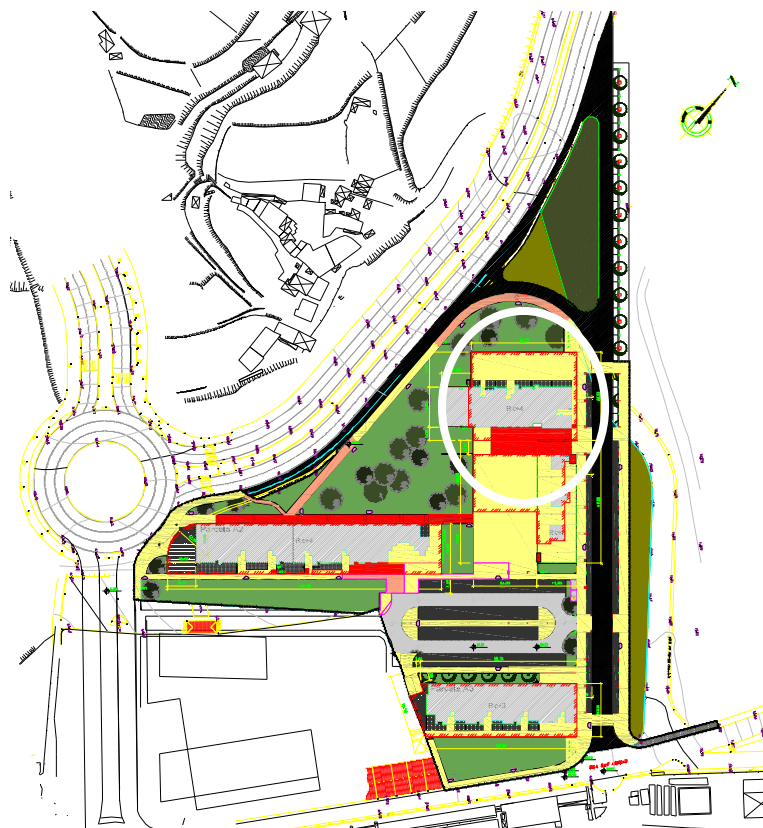


Figura 53- Plano do caso de estudo

Todo o desenvolvimento e análise confina-se à Parcela A do conjunto, sendo os resultados análogos para os restantes edifícios. Cada piso do edifício em estudo é composto por dois apartamentos T3. Os caudais mínimos são impostos por requisitos mínimos de QAI de 155 [m³/h]. O caudal nominal é de 1.2 renovações por hora dos apartamentos. Atendendo ao número total de apartamentos estima-se um caudal mínimo necessário para o edifício de 960 [m³/h].

A configuração dos pisos do edifício é representada na Figura 54. Os apartamentos têm uma área útil de pavimento de cerca de 85 m² e pé-direito de 2,5 m. São constituídos por três quartos, uma sala, cozinha e duas casas de banho. Têm duas frentes, encontrando-se a sala orientada a sul. A cobertura do edifício é horizontal e a envolvente está regulamentada ao abrigo do RCCTE.

O permutador encontra-se localizado a SW do edifício e a admissão, desde o colector de saída do permutador, é feita pela caixa de elevador. O permutador encontra-se enterrado em terreno descoberto com solo relvado.

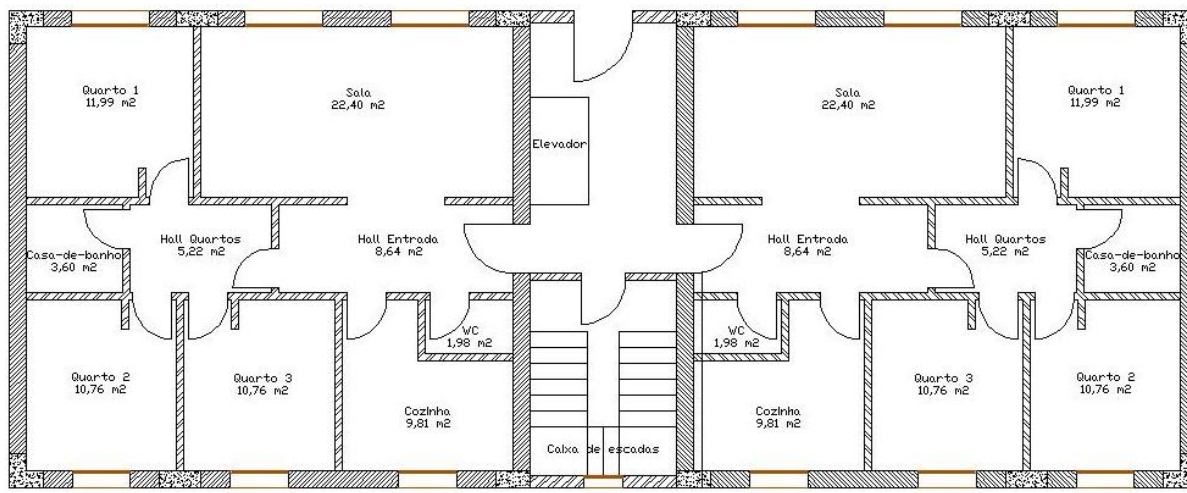


Figura 54- Esquema dos pisos do edifício

Para simular o comportamento térmico do edifício ao longo do tempo recorreu-se ao software TRNSYS [51, 52], neste foram introduzidas todas as condições do edifício bem como os dados relativos ao permutador de tubos enterrados. Face às necessidades do edifício foram especificadas as características do permutador necessárias para levar o interior dos espaços climatizados a condições de conforto. As simulações realizadas no TRNSYS têm como variáveis de saída as temperaturas dos espaços climatizados e permitem observar o resultado da integração do permutador no edifício face às condições interiores.

A adaptação de modelos dinâmicos do EES no TRNSYS é muito limitada. De facto o modelo do permutador de tubos enterrados não pode ser integrado pela via estipulada pelo TRNSYS. Assim sendo, os modelos do permutador e do edifício tiveram de ser integrados com recurso a soluções de compromisso que permitiram relacionar os dados de ambos os modelos. O esquema de integração dos dois modelos é esquematizado na Figura 55.

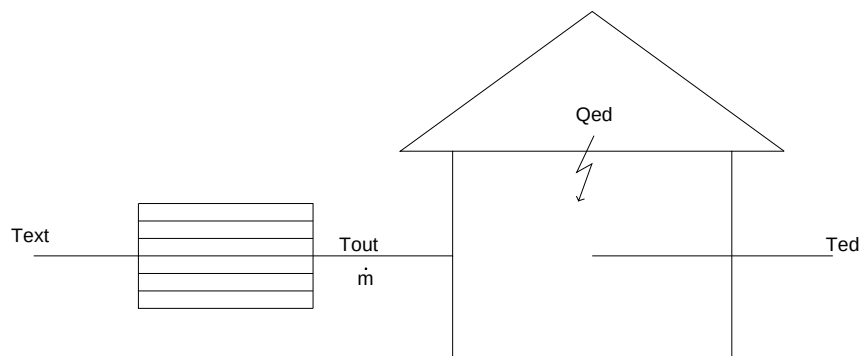


Figura 55- Esquema de integração do permutador com o edifício

Os dados do comportamento térmico do edifício em “*free floating*”, e sem nenhum sistema de climatização acoplado, foram retirados da simulação do mesmo e introduzidos como condicionantes do modelo do permutador. Posteriormente, sabendo que a temperatura do ar à entrada do edifício é igual à temperatura do ar à saída do permutador introduziram-se os dados de resposta do permutador novamente no edifício, representando o sistema de climatização. Numa nova simulação, em ponto flutuante, obteve-se a evolução da temperatura de uma habitação com o permutador acoplado.

Para realizar as iterações acima descritas tanto o modelo do edifício como o do permutador tiveram de ser adaptados. No caso do permutador tiveram de ser introduzidas tabelas exteriores ao programa e posteriormente associadas as variáveis para o cálculo da potência do permutador e da temperatura à saída do mesmo. No modelo do edifício foi acoplado um bloco novo de leitura de dados onde foram integradas as variáveis de saída do permutador, este bloco por sua vez foi ligado ao modelo principal do edifício com uma carga representativa de um sistema de climatização.

Ainda, a solução proposta inclui um sistema de controlo que, correspondendo à interacção do permutador com o edifício, permite tirar o máximo partido do permutador.

6.2. Controlo e Apoio do Sistema

Como é fácil de prever um sistema que funcione permanentemente produzirá, em certas alturas, resultados contrários aos desejados, ou estará em funcionamento durante períodos em que tal não é necessário. Por exemplo, no período de arrefecimento a temperatura do ar pode, em certas horas do dia, atingir valores inferiores à temperatura do ar à saída do permutador, situação esta que pode ser observada na Figura 56. Nestas ocasiões é de todo vantajoso introduzir ar do exterior em vez de gastar o recurso do permutador, o solo.

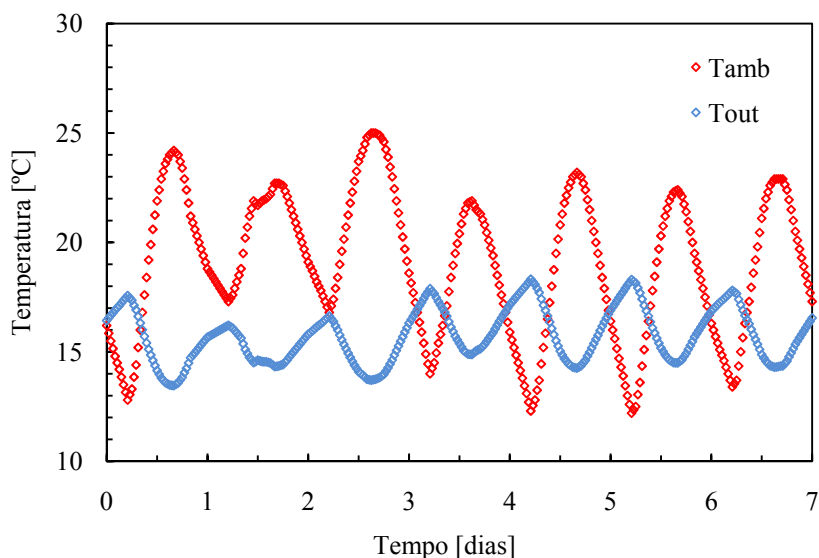


Figura 56- Comparação entre a temperatura ambiente e à saída do permutador permanentemente em Julho

Para evitar desperdícios energéticos e aumentar a eficiência, impõe-se aos sistemas um programa de controlo específico que satisfaz as necessidades da aplicação.

O sistema de arrefecimento passivo não é uma excepção neste sentido. O controlo do permutador fixa dois regimes de funcionamento a caudal constante, o caudal nominal, correspondente às 1.2 rph, para quando o sistema se encontre nas condições nominais de funcionamento e o caudal mínimo (0,6 rph) nos casos em que o sistema só precise de manter as condições mínimas da QAI. O ventilador nunca estará desligado, pois quando não força ar pelo permutador circula nas condutas de ventilação ar directo do exterior.

Foi idealizado um programa de controlo que basicamente tem dois modos de funcionamento, um ciclo de funcionamento diário, com o controlo das temperaturas de entrada e saída do permutador e a monitorização da temperatura interior do edifício.

O ciclo de funcionamento do sistema baseia-se na densidade de ocupação de edifícios residenciais [53] e está programado para controlar as horas em que o edifício se encontra ocupado e antecipar as condições de conforto para as horas de ocupação. O ciclo de funcionamento é repetido todas as semanas do ano sem distinção.

O ventilador está programado para entrar no regime nominal uma hora antes do início da ocupação do edifício e desligar uma hora antes de o edifício ficar desocupado. A Figura 57 apresenta o perfil de ocupação utilizado para o edifício em estudo e o ciclo de funcionamento do ventilador respectivamente.

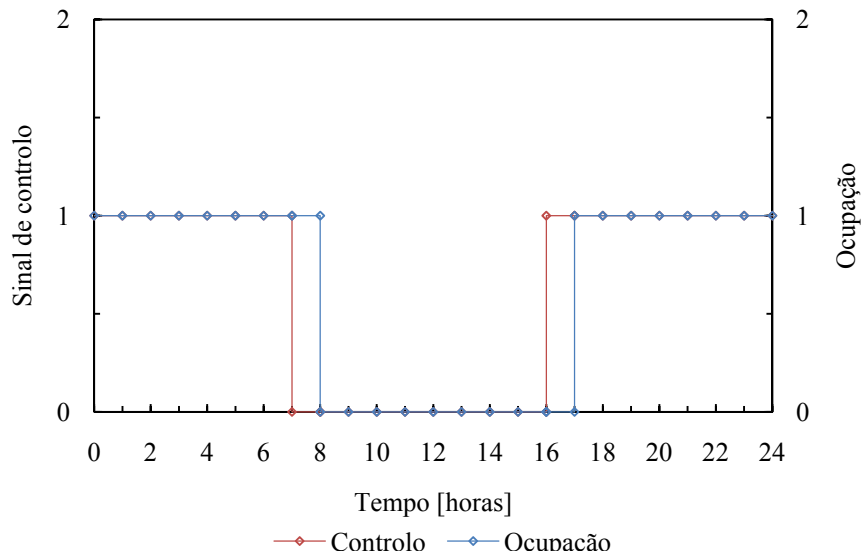


Figura 57- Período de funcionamento do ventilador

O permutador ar-terra é monitorizado nos colectores de entrada e saída de ar para se poder verificar se está a trabalhar em prol ou contra os efeitos desejados, isto é, na época de arrefecimento, o circuito do permutador abre, se a temperatura ambiente for superior à da saída do mesmo e fecha se a temperatura ambiente for inferior. No caso de o permutador estar fechado, o colector de saída passa a admitir ar directamente do exterior e a injectar esse ar no edifício. No período de aquecimento acontece o contrário, obrigando a circular o ar pelo permutador só quando a temperatura de saída deste é superior à do exterior.

Para que este controlo seja possível o colector de saída deve possuir “*dampers*” para controlar as bocas dos tubos enterrados e para as entradas do ar exterior.

Capítulo 7

Resultados da Aplicação do Caso de Estudo

7. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Resumo do Capítulo

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação do sistema de arrefecimento num edifício multifamiliar. Reporta a evolução da temperatura interior de um apartamento modelo, representativo do edifício, com o objectivo de avaliar a capacidade do permutador para manter condições de conforto ao longo do ano.

Com base nos dados aprovados na análise de sensibilidade, projectou-se um permutador de tubos enterrados que, segundo se pensa, reúne as características favoráveis para o caso de estudo onde foi aplicado este sistema, tal como se apresentou no capítulo anterior.

O permutador foi integrado como único sistema de climatização do edifício. Neste capítulo é estudada a capacidade do sistema manter condições de conforto térmico. Os resultados das temperaturas em “free floating” apresentados neste trabalho correspondem a um único apartamento do edifício, sendo análogos os cálculos para as restantes zonas do edifício.

A configuração do permutador simulado é descrita nas Tabelas VIII e IX:

Tabela VIII- Dados de simulação

Característica	Valor
Localidade	Porto
Solo	Granito
Porosidade	40%
Humidade do solo	60%
α_{solo}	0,8
f	0,4-0,7 ⁷
ρ_{solo}	1800 [kg/m ³]
Profundidade Y	2 [m]
Profundidade E	1,5 [m]

Tabela IX- Dados de simulação

Característica	Valor
Tipo de tubo	Grés vitrificado
Número de tubos	10
Comprimento	35 [m]
d_{in}	100 [mm]
$r_{\text{g,tubo}}$	0,04 [mm]
N	11
J	9
$\dot{V}$	155·8 [m ³ /h]

⁷ Solo parcialmente húmido (0,4) e relvado (0,7)

Resultados da Aplicação do Caso de Estudo

Para as condições supracitadas o permutador ocupa uma área horizontal de 64,4 [m²] com aproximadamente 7 [m] de profundidade e apresenta a evolução de potência descrita na Figura 58.

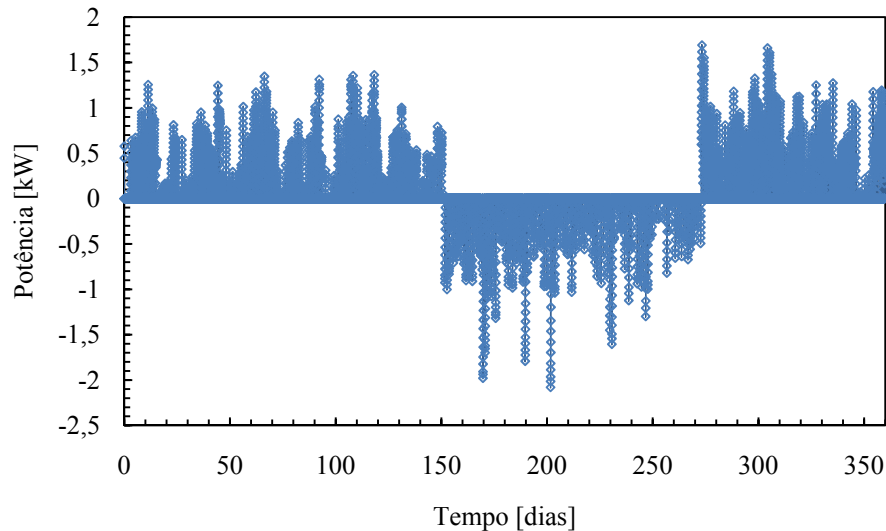


Figura 58- Potência do permutador ao longo do ano de simulação

A potência do permutador obtida é, em valores médios, 1 [kW] para todo o ano. Durante o período de arrefecimento, o sistema armazena 266 [kWh] no solo e na época de aquecimento o sistema consegue fornecer ao ar uma energia de 871 [kWh], resultando num diferencial de energia retirada do solo de 605 [kWh].

Em resultado da integração do sistema no edifício, a temperatura interior exhibe a evolução que se apresenta na Figura 59. Numa análise simplista é possível comparar a evolução da temperatura do espaço com a temperatura exterior. Observa-se que a fracção consegue atingir temperaturas abaixo dos 25 [°C] durante toda a época de arrefecimento favorecido pelas condições climáticas que não atingem temperaturas muito acima do valor de referência durante o mesmo período. No período de aquecimento é notório o efeito do permutador ao manter a habitação acima da temperatura exterior, mas como era de esperar, este sistema por si só não consegue manter temperaturas de conforto.

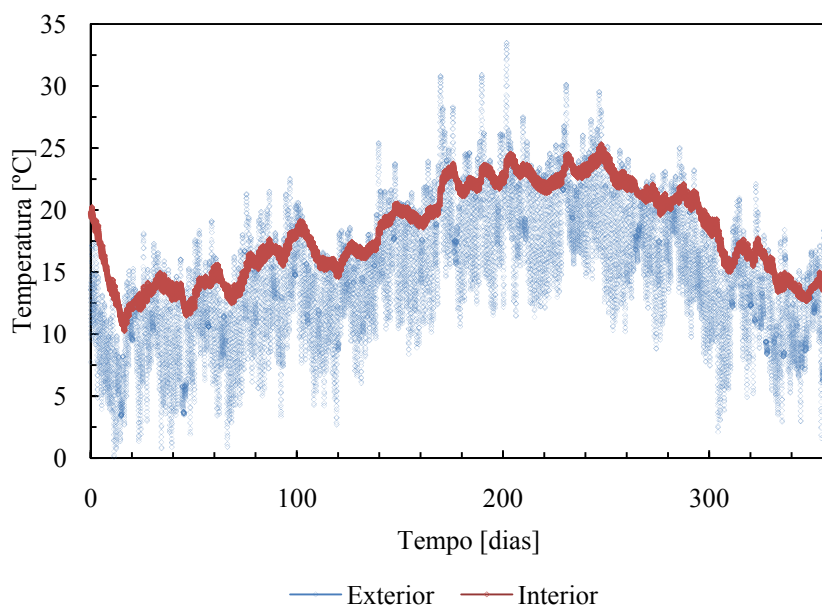


Figura 59- Temperatura exterior e do espaço climatizado

Na fracção simulada não se verificam ocorrências de sobreaquecimento durante o período de aquecimento, nem mesmo existem ocorrências superiores a 1% para temperaturas iguais ou superiores aos 26 [°C]. Em contrapartida, os resultados afastam-se da temperatura de referência para valores inferiores, as frequências de ocorrências de tais desvios, em que a temperatura se mantém abaixo dos 25 e acima das temperaturas indicadas, estão discriminadas na Figura 60.

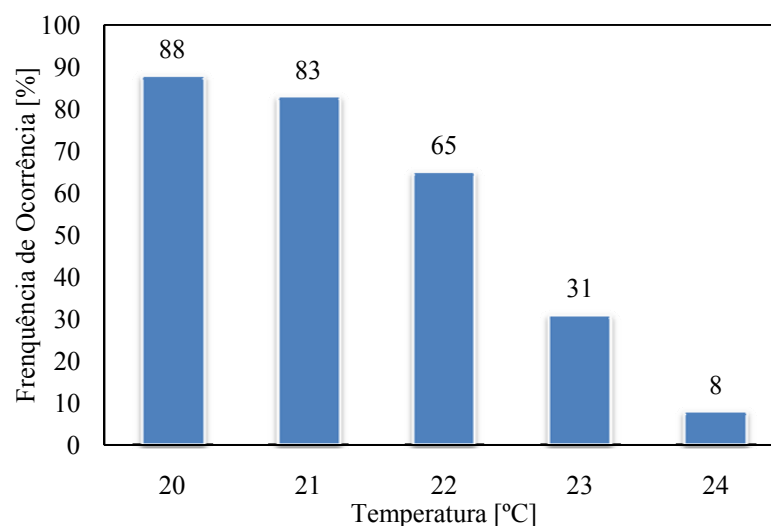


Figura 60- Ocorrência de temperaturas inferiores às indicadas no período de arrefecimento

É possível verificar que, um desvio de 3 [°C] abaixo da temperatura de referência ocorre com uma frequência de 65%. Valor este que é consideravelmente alto e pode dever-se a excesso de potência para o permutador. Assim, poderiam reduzir-se os caudais de circulação ou o

Resultados da Aplicação do Caso de Estudo

comprimento dos tubos. Contudo, esta correcção pode fazer com que a temperatura na habitação exceda a de referência.

Em 107 dias no período de arrefecimento verifica-se que a temperatura do espaço mantém-se numa gama aceitável de temperaturas de conforto, 25 a 20 [°C] o que corresponde a 88% do tempo considerado.

Já na estação de aquecimento registam-se temperaturas acima dos 20 [°C], embora com baixa frequência – 3% para o incremento de 1 [°C]. A ocorrência de temperaturas abaixo da de conforto distribui-se conforme a Figura 61.

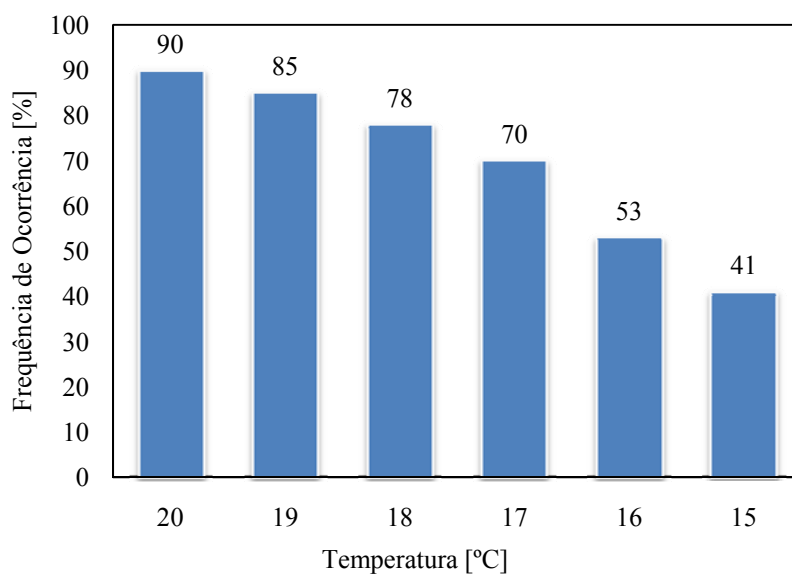


Figura 61- Frequência de ocorrência de temperaturas inferiores às indicadas no período de aquecimento

O facto das frequências apresentadas na Figura 61 serem elevadas é um indício de que o permutador não é capaz de manter condições de conforto por si só. Assim, pode funcionar como apoio de um sistema convencional ou tendo este tipo de sistema como auxílio.

Com base nos estudos feitos até este capítulo pode-se afirmar que é viável massificar esta tecnologia para edifícios multifamiliares de elevada ocupação com recurso a espaços compactos.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

Conclusões

Trabalhos Futuros

8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Resumo do Capítulo

Neste capítulo concentram-se as conclusões e lições aprendidas ao longo do trabalho e apresentam-se os trabalhos futuros a desenvolver na continuação da investigação sobre os permutadores de tubos enterrados.

8.1. Conclusões

A implementação de sistemas de arrefecimento por tubos enterrados tem sido explorada em crescente número em edifícios de serviços com grandes disponibilidades de terreno para a instalação destes permutadores. O trabalho reportado neste documento teve por objectivo ampliar as aplicações desta tecnologia para edifícios residenciais nos quais os espaços de instalação são limitados, analisando a viabilidade de permutadores compactos que possam cobrir os requisitos deste tipo de construções.

O comportamento térmico do solo é o princípio base de funcionamento do permutador, sendo este controlado pelas suas propriedades térmicas, a saber, a condutibilidade térmica, a capacidade térmica e a densidade. Por sua vez as, características supracitadas são fortemente influenciadas pela porosidade e humidade do solo, esta última domina o valor final da capacidade térmica do solo, fazendo com que seu valor seja muito próximo das propriedades da água para qualquer tipo de solo. A condutibilidade, ao contrário da capacidade térmica, possui uma variabilidade muito maior. Considerando todos os solos estudados obteve-se uma amplitude máxima de 5 [W/m·K].

Nas simulações efectuadas provou-se que, apesar da condutibilidade do solo ter fortes variações, o tipo de solo não é um parâmetro de peso no desempenho do permutador. Concluiu-se ainda que, a capacidade térmica é o principal elemento a ter em conta na escolha do solo, optando-se sempre que possível pelos materiais com os valores mais elevados.

Dos modelos matemáticos desenvolvidos verificou-se que o modelo discreto monodimensional responde satisfatoriamente aos requisitos do problema e por um lado, aproxima-se mais do que o modelo analítico à evolução temporal real do sistema. Mais ainda, produz resultados em tempos mais curtos do que o modelo bidimensional sem sacrificar a

exactidão dos resultados. As diferenças máximas registadas foram de 2,5 [°C] em todos os exemplos estudados.

Os permutadores ar-terra compactos apresentam resultados aliciantes quando comparados com as configurações simples, tendo-se observado que as perdas na potência devido à exploração intensa do solo compensam perante a redução da área de intervenção. Enquanto a potência média reduz-se de 3 a 6 %, a área necessária para a instalação diminui 67%. Factor este bastante atractivo, face às limitações actuais nos espaços urbanos.

Dos parâmetros analisados observou-se que os factores predominantes no desempenho do permutador são a velocidade de escoamento e o espaçamento entre andares do permutador. Para maximizar a potência debitada por este sistema devem procurar manter-se velocidades elevadas que garantam um escoamento em regime turbulento, mas atendendo às questões de ruído recomenda-se limitar as velocidades no máximo aos 5 [m/s], contudo este valor pode ser adaptado segundo as condições da instalação do sistema.

A permanência de altas velocidades implica uma selecção conveniente do diâmetro e do número dos tubos. Devem manter-se diâmetros pequenos e aumentar-se o número de tubos. Desta forma aumenta-se a área de transferência de calor sem sacrificar a velocidade do escoamento.

A distância entre tubos, para as condições em que foi simulado o permutador, foi de 1,5 [m] embora este valor mantenha boa relação de compromisso entre a quantidade de solo utilizado e a intensidade com que ele é explorado. Ao longo do ano este não se manteve saturado nem possuiu zonas sem utilização permanente. Obviamente o desempenho do sistema melhora se esta distância aumentar, por isso quando as escavações da construção do edifício permitem ter intervalos entre andares maiores é boa prática aproveitar toda a profundidade disponibilizada.

Finalmente, recomenda-se uma ordem para dimensionar facilmente todos os parâmetros do permutador. Perante as condições impostas pelo caso prático, que normalmente são os caudais a insuflar e a localidade, escolhe-se o tipo de solo em que vai ser instalado o sistema. Só no Porto é que, perante os custos, pode preferir-se criar um solo arenoso em vez de o granítico original. Posteriormente deve escolher-se o diâmetro dos tubos para que a velocidade do ar se mantenha entre os 3 a 5 [m/s], de forma iterativa fixa-se o número de tubos e ajusta-se o diâmetro dos mesmos para que, reduzindo ligeiramente a velocidade, se aumente a área de transferência de calor. Por último maximiza-se a potência por aproveitar a maior parte ou até a totalidade da área disponível com o comprimento dos tubos e o espaçamento entre andares.

Cabe mencionar que uma vez otimizada a configuração do permutador compacto espera-se que os resultados se assemelhem aos obtidos no capítulo anterior, em que se conseguem manter as condições de conforto durante a temporada de arrefecimento e, no período de aquecimento, seja necessário um sistema alternativo para a climatização do espaço.

Os resultados mostram que estes sistemas podem ser implementados em edifícios urbanos com recurso a pouca área de instalação e ao mesmo tempo mantendo o conforto térmico no verão.

8.2. Trabalhos Futuros

Ao longo do trabalho desenvolvido foram formuladas uma série de questões e preocupações que podem ser continuadas dentro do desenvolvimento dos sistemas com permutadores de tubos enterrados. Ficam aqui registadas algumas das questões com maior relevância:

- Análise da influência da simulação discretizada das propriedades do solo envolvidas no princípio de funcionamento dos permutadores ar-terra
- Estudo do espaçamento óptimo entre os tubos de uma mesma camada do permutador
- Realizar uma análise exergética ao permutador para estudar o tempo de vida do sistema
- Integrar esta tecnologia com outros sistemas passivos de aplicação em edifícios multifamiliar recorrendo a programas multizona (TRNSYS)
- Desenvolver um sistema de controlo com regulação de caudal variável

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. P. o. B. Directive, "www.buildingsplatform.org," 2002-2007.
- [2] PER, "<http://www.eficiencia-energetica.com/html/eee/eee.htm>," 2005-2007.
- [3] Retscreen, "Ground Source Heat Pump Project Model," 2005.
- [4] M. Zimmermann, "Ground cooling with air," Schwerzenbach 1998.
- [5] M. Zimmermann, "The Schwerzenbacherhof Office and Industrial Building," Schwerzenbach 1998.
- [6] INETI, "Edificio Solar XXI," 2005.
- [7] M. Cucumo, S. Cucumo, L. Montoro, and A. Vulcano, "A one-dimensional transient analytical model for earth-to-air heat exchangers, taking into account condensation phenomena and thermal perturbation from the upper free surface as well as around the buried pipes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 506-516, 2008.
- [8] V. Badescu, "Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 845-855, 2007.
- [9] M. Bojic, N. Trifunovic, G. Papadakis, and S. Kyritsis, "Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building," *Energy*, vol. 22, pp. 1151-1158, 1997.
- [10] G. H. P. Consortium, "<http://www.geoexchange.org/>," 2005.
- [11] S. Medved and B. Cerne, "A simplified method for calculating heat losses to the ground according to the EN ISO 13370 standard," *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 523-528, 2002.
- [12] "Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Field Tests." vol. 1118-TRP, ASHRAE, Ed.: ASHRAE.
- [13] C. Clauser and E. Huenges, "Thermal conductivity of rocks and mineral," *American Geophysical Union*, 1995.
- [14] U. Schärli and L. Rybach, "Determination of specific heat capacity on rock fragments," *Geothermics*, vol. 30, pp. 93-110, 2001.
- [15] T. E. Ochsner, R. Horton, and T. Ren, "A New Perspective on Soil Thermal Properties," *Soil Sci Soc Am J*, vol. 65, pp. 1641-1647, November 1, 2001 2001.
- [16] N. H. Abu-Hamdeh and R. C. Reeder, "Soil Thermal Conductivity: Effects of Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter," *Soil Sci Soc Am J*, vol. 64, pp. 1285-1290, July 1, 2000 2000.
- [17] R. C. DeLapp and E. J. LeBoeuf, "Thermal Analysis of Whole Soils and Sediment," *J Environ Qual*, vol. 33, pp. 330-337, January 1, 2004 2004.
- [18] E. Ramalho and A. Correia, "Updated Surface Heat Flow Density Map in Mainland Portugal," in *Proceedings World Geothermal Congress*, Turkey, Antalya, 2005, p. 4.

Referências Bibliográficas

- [19] G. Mihalakakou, M. Santamouris, J. O. Lewis, and D. N. Asimakopoulos, "On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles," *Solar Energy*, vol. 60, pp. 181-190, 1997.
- [20] R. Kumar, A. R. Sinha, B. K. Singh, and U. Modhukalya, "A design optimization tool of earth-to-air heat exchanger using a genetic algorithm," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 2282-2288, 2008.
- [21] H. Wu, S. Wang, and D. Zhu, "Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air-pipe systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 1462-1471, 2007.
- [22] S. Thiers and B. Peuportier, "Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France," *Solar Energy*, vol. In Press, Corrected Proof.
- [23] J. Pfafferott, "Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency," *Energy and Buildings*, vol. 35, pp. 971-983, 2003.
- [24] N. Kyriakis, A. Michopoulos, and K. Pattas, "On the maximum thermal load of ground heat exchangers," *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 25-29, 2006.
- [25] G. Mihalakakou, M. Santamouris, D. Asimakopoulos, and I. Tselepidaki, "Parametric prediction of the buried pipes cooling potential for passive cooling applications," *Solar Energy*, vol. 55, pp. 163-173, 1995.
- [26] V. Badescu, "Economic aspects of using ground thermal energy for passive house heating," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 895-903, 2007.
- [27] A. Mustafa Omer, "Ground-source heat pumps systems and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 344-371, 2008.
- [28] J. V. B. d. Costa, *Caracterização e constituição do solo*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [29] J. Grotzinger, *Understanding Earth*. New York: W. H Freeman and Company, 2007.
- [30] "www.dct.uminho.pt."
- [31] *Atlas de Portugal*. Lisboa: Instituto Geográfico Português, 2005.
- [32] INETI, "e-geo.ineti.pt/bds/lexico_geologico/".
- [33] P. A. Domenico and F. W. Schwartz, *Physical and chemical hydrogeology*. New York [etc.]: John Wiley & Sons, 1998.
- [34] Y. S. Touloukian and E. H. Buyco, *Specific Heat Nonmetallic Solids*. New York: IFI/Plenum, 1970.
- [35] Y. S. Touloukian, *Thermal Conductivity Nonmetallic*. New York: IFI/Plenum, 1970.
- [36] C. C. Plummer and D. McGeary, *Physical geology*. Boston [etc.]: McGraw Hill, 2003.
- [37] S. Chernicoff and D. Whitney, *Geology an introduction to physical geology*. Boston New York: Houghton Mifflin Company, 2002.
- [38] M. Rocha, *Mecânica das rochas*. Lisboa: LNEC, 1981.
- [39] Schlumberger, "<http://www.seed.slb.com/qa2/FAQView.cfm?ID=561>," 2008
- [40] J. Cook, *Passive cooling*. Cambridge: <<The>> MIT Press, 1989.

- [41] G. Florides and S. Kalogirou, "Ground heat exchangers--A review of systems, models and applications," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 2461-2478, 2007.
- [42] METEOTEST, "METEONORM 5," 2004.
- [43] G. Mihalakakou, "On estimating soil surface temperature profiles," *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 251-259, 2002.
- [44] V. S. Arpaci, *Conduction heat transfer*. Reading: Addison Wesley, 1966.
- [45] M. N. Özisik, *Heat Conduction*. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [46] J. Leivas, A. Gusso, D. Cybis Fontana, and M. Berlato, "Estimativa do balanço de radiação na superfície a partir de imagens do satélite ASTER," in *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto Brasil*, Florianópolis: INPE, 2007.
- [47] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 5th ed. McGraw-Hill: Boston, 2003.
- [48] F. P. Incropera, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th ed ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2007.
- [49] Centralplast, "Tubagem em PEAD," 2008.
- [50] KERAMO/DENOS, "Tubos de grés vitrificado."
- [51] U. o. W. System, "TRNSYS - Transient Systems Simulation program," 2007.
- [52] D. d. B. e. Borges, "Avaliação do impacto do solar térmico para produção de AQS e apoio à climatização no âmbito da nova Regulamentação," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [53] P. A. d. S. V. M. Ferreira, "Sistemas de ventilação híbridos em edifícios análise energética resultante da implementação de sistemas de ventilação inovativos," in *Mecânica, Energia* Porto: FEUP, 2006, pp. 291 p.-291 p.

Anexos

Anexo A – Atlas de Portugal

Anexo B – Tipos de formações geológico-mineiras dos solos de Portugal

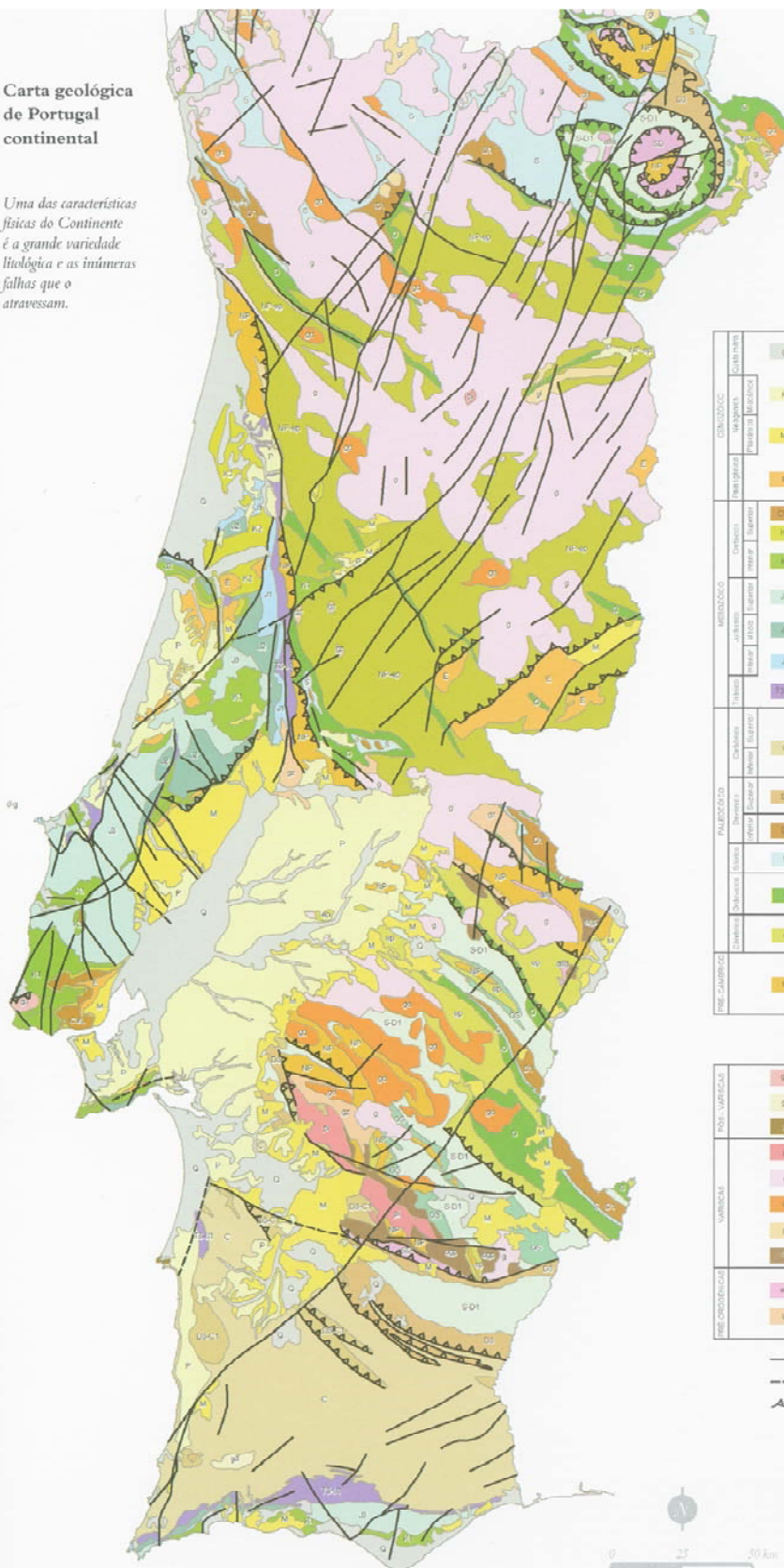
Anexo C – Código base do modelo analítico

Anexo D – Código base do modelo discreto do permutador de três andares

ANEXO A: Carta Geológica de Portugal

Carta geológica de Portugal continental

Uma das características físicas do Continente é a grande variedade litológica e as inúmeras falhas que o atravessam.



PERÍODO	SÍMBOLO	LITOTIPO	DESCRIÇÃO
CENÓZOICO	Q	Depósitos de aluviões, praias, dunas e detritos	
	P	Areias, arenitos e argilas	
	M	Arenitos, argilas e calcários arenosos	
	E	Argilas, arenitos e conglomerados	
MESOZOICO	15	Complexo Vulcânico de Lisboa: rochas vulcânicas e sedimentares	
	14	Arenitos, argilas e calcários	
	13	Calcários, margas e arenitos	
	12	Calcários, margas e arenitos	
	11	Calcários e margas	
	10	Calcários, arenitos e margas	
PRÉ-CAMBRIANO	9	Arenitos, pedregal, vulgares e rochas vulcânicas e sedimentares	
	8	Taludais ígneos e graníticos, arenitos e conglomerados	
	7	Granitos, ígneos e metamórficos	
	6	Granitos, ígneos, arenitos, calcários e argilas	
	5	Granitos, ígneos, arenitos, calcários e argilas	
	4	Granitos, ígneos, arenitos, calcários e argilas	
	3	Granitos, ígneos, arenitos, calcários e argilas	
	2	Granitos, ígneos, arenitos, calcários e argilas	
	1	Granitos, ígneos, arenitos, calcários e argilas	
	0	Granitos, ígneos, arenitos, calcários e argilas	

Rochas Magmáticas Intrusivas

PERÍODO	SÍMBOLO	LITOTIPO	DESCRIÇÃO
PRÉ-CAMBRIANO	1	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	
	2	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	
	3	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	
	4	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	
MESOZOICO	5	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	
	6	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	
	7	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	
	8	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	
CENÓZOICO	9	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	
	10	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	
	11	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	
	12	Granitos, ígneos e metamórficos (placó de Lisboa)	

Falha
 Falha Provável
 Carreamento/Cavalgamento

ANEXO B: Tipos de Formações Geológico-Mineiras dos Solos de Portugal

Areia (Sand):

Fragmento mineral de dimensões que variam entre 1/16mm e 2 mm de diâmetro. É também uma rocha sedimentar detrítica não consolidada.

Os grãos de areia são *maioritariamente* constituídos por quartzo, podendo também, ser constituídos por outros minerais, dependendo da rocha que lhes deu origem e da quantidade de transporte e alteração a que foram submetidos.

As propriedades térmicas consideradas em estudos anteriores mostram que o quartzo possui uma condutibilidade térmica de 6,15 a 10,17 [W/m·K] e uma capacidade térmica específica de 700 a 819 [J/kg·K]. Tais dados representam uma gama de valores bastante alta, o que faz da areia uma boa alternativa para a aplicação de tubos enterrados. Embora a condutibilidade seja logo diminuída devido à porosidade do solo, os valores finais que ela apresenta podem ser considerados elevados.

Alguns trabalhos reportam os valores das características térmicas do tipo de areia utilizada nos seus estudos. Nestes a condutibilidade térmica comporta não só a quantidade de mineral (quartzo) como as percentagens de distribuição da água e ar nos poros. Na Tabela X estão mencionados alguns dos valores recolhidos.

Tabela X- Propriedades térmicas da areia recolhidas em vários artigos científicos

Referência Nº	Condutibilidade Térmica (λ)	Calor Específico (C_p)
	[W/m·K]	[J/kg·K]
[41]	2,2-2,8	---
[11]	2,0	---
[15]	3,72	801
[16]	---	820-1670
[14]	---	767-819

Argila (Clay):

Mineral silicatado de alumínio (Al) de dimensões reduzidas, cerca de 1/256 mm de diâmetro (Escala de Wentworth).

Alguns exemplos de minerais de argila são a ilite, caulinite, montmorilonite e andalucite, entre outros.

Para o caso da andalucite a condutibilidade térmica é de 6,56 [W/m·K] e para uma variedade de “silty mudstone” o calor específico é de 798 a 831 [J/kg·K]. Apesar de ter uma condutibilidade inferior à da areia possui uma capacidade térmica superior.

Este mineral é habitualmente encontrado com grandes percentagens de água nos poros, tal condição de saturação eleva ainda mais a sua propriedade de armazenamento de calor. Também tem como característica ser impermeável à água o que pode constituir uma vantagem em termos construtivos, permitindo otimizar as características do sistema de arrefecimento por tubos enterrados.

Arenitos (Sandstone):

Rocha sedimentar detrítica constituída por grãos de areia agregados por um cimento que pode ser silicioso, carbonatado ou composto por óxidos ou hidróxidos de ferro.

Os grãos de areia são maioritariamente constituídos por quartzo (entre 85% a 90%) e a matriz é fina e de características argilosas.

O arenito pode apresentar-se estratificado ou não, ou com estratificação entrecruzada.

Um arenito que contenha mais de 25% de feldspatos denomina-se arcose.

As propriedades térmicas do mineral são em tudo semelhantes à areia, podendo diferir nos valores da constituição global do solo devido à porosidade e ao teor de água.

Conglomerados (Conglomerate):

Rocha constituída por fragmentos de outras, que foram depositados e cimentados. Estes fragmentos têm dimensões superiores a 2 mm e são rolados.

Este tipo de rocha, sendo uma combinação de outras rochas e minerais, possui características intermédias dos seus componentes. Para este estudo não tem grande interesse determinar todos os possíveis valores intermédios que os solos podem adoptar mas sim os valores limites com que se pode contar para contabilizar o potencial térmico do solo. Sendo assim, um valor médio (5,06 [W/m·K]) foi atribuído para a condutibilidade térmica de forma a não alterar as conclusões pretendidas. Já no caso do calor específico, como existia informação específica disponível, é considerada a gama de 764 a 796 [J/kg·K].

Calcários (Limestone):

Rocha sedimentar carbonatada, constituída essencialmente por carbonato de cálcio (calcite), em quantidade superior a 50%, podendo conter também carbonato de magnésio (dolomite) e outros minerais incorporados (sílica, argilas, feldspato e pirite, entre outros). Normalmente, um calcário apresenta cerca de 95% de calcite e menos de 5% de dolomite.

Pode ter textura detrítica ou clástica ou textura cristalina.

É uma rocha de ambiente marinho, formada por processos de origem orgânica (edifícios recifais bioconstruídos e acumulação de restos de carapaças e esqueletos) ou inorgânica, resultando da acumulação de fragmentos (oólitos) ou ainda, resultar de precipitação química.

Os valores atribuídos para esta rocha correspondem aos da calcite e são 3,16 [W/m·K] para a condutibilidade térmica e 827 [J/kg·K] para o calor específico.

Marga (Marl):

Rocha sedimentar carbonatada constituída por uma mistura de calcite e dolomite e cerca de 35% a 60% de argila.

Neste caso foi adoptada uma distribuição mineral em partes iguais de calcite e dolomite junto com uma percentagem média de argila de 47,5%. Tal é aplicada unicamente para o cálculo da condutibilidade térmica porque não existem dados suficientes para poder ser aplicada à capacidade térmica. A expressão que se segue explica o critério utilizado.

$$\textbf{Marga} = 0,475 \cdot \textbf{Argila} + (1 - 0,475) \cdot (0,5 \cdot \textbf{Calcite} + 0,5 \cdot \textbf{Dolomite})$$

O resultado da equação é de 2,80 [W/m·K].

No caso da C foi atribuído um valor médio entre a mármore, visto ter grande parte dos minerais da marga, e a argila, o que resulta em 809 [J/kg·K].

Granitos (Granit):

Rocha ígnea plutónica constituída essencialmente por quartzo e feldspatos (que podem chegar a ocupar cerca de 85% a 95% da composição da rocha) tendo como minerais acessórios a biotite, moscovite e anfíbolos. Podem ainda ocorrer próximas e oficinas.

A textura dos granitos é variável, consoante o tamanho dos minerais e o seu hábito. É uma característica importantíssima na classificação e uso destas rochas como rochas ornamentais.

Como no caso da marga foram aplicadas distribuições unicamente para a condutibilidade térmica, pelos motivos já enunciados. Assim, a equação (49) traduz a percentagem de cada elemento.

$$\text{Granito} = 0,90 \cdot \frac{\text{Quartzo} + \text{Orthoclasse}}{2} + 0,10 \cdot \frac{\text{Biotite} + \text{Muscovite} + \text{Anfíbola}}{3} \quad (49)$$

Para esta equação obtém-se 5,12 [W/m·K].

A capacidade térmica está determinada para o conjunto “granito”, sendo esta de 720 [J/kg·K].

Xistos (Schists):

Rocha metamórfica com composições variadas, que se caracteriza essencialmente pela xistosidade. Pode ter diversos protólitos, dando assim origem a xistos com características mineralógicas diferentes, havendo predominância dos filossilicatos.

Resultam de metamorfismo em rochas que podem variar desde basaltos a rochas plutónicas ou até pelitos.

A forte xistosidade que os caracteriza faz com se desagreguem muito facilmente segundo planos paralelos. Isto deve-se ao facto dos minerais lamelares (filossilicatos) serem bem desenvolvidos e orientados paralelamente.

Dependendo do protólito, o xisto pode ser micáceo, verde, azul ou mosqueado, entre outros.

A composição considerada neste trabalho é de três minerais principais: Muscovite, Biotite, Microcline. Estes encontram-se tanto nos xistos como nos micaxistos e nos xistos metamórficos sendo as diferenças entre eles pouco influentes nas propriedades térmicas do solo.

Condutibilidade térmica: 3,02 [W/m·K].

Calor específico (Serpentine): 915 a 916 [J/kg·K].

Mármore (Marble):

Rocha metamórfica constituída essencialmente por minerais carbonatados (calcite ou dolomite) em quantidade superior a 50%, tendo como protólito um calcário, dolomite ou marga.

O mármore pode apresentar várias faces, tais como, bandado ou brechóide, embora as faces mais comuns, sejam a mármore maciça.

A variedade de cores que a mármore pode apresentar localmente se origina das 'impurezas' nela contidas, tais como, argilas, areias ou inclusões de minerais metálicos (óxidos).

Escolheu-se um mármore predominantemente composto por calcite e marga, sendo este apenas um exemplo de todas as combinações que acabam por resultar em valores intermédios.

Novamente, no caso da capacidade térmica existe um valor específico para esta formação rochosa.

Condutibilidade térmica: 3,02 [W/m·K].

Calor específico (Serpentine): 915 a 916 [J/kg·K].

Quartzito (Quartzite):

Rocha metamórfica granoblástica com mais de 75% de quartzo, cujo protólito é um arenito quartzoso ou, menos comum, um tufo ou riólito silicioso.

Visto sua composição mineral ser bastante semelhante à areia, as suas características térmicas também o são. Embora a quantidade de quartzo existente seja menor, esta é ainda largamente predominante sobre qualquer outro mineral. Assim sendo, o quartzito tem as mesmas propriedades que o quartzo e a areia.

Gnaiss (Gneiss):

Rocha metamórfica de composição essencialmente quartzo-feldspática (feldspato potássico, plagioclase, quartzo e biotite), com granularidade média a grosseira, tendo como protólito o granito ou a arcose. Mostra-se geralmente bandada com alternância de bandas claras, quartzo-feldspáticas e escuras, constituídas pelos elementos máficos.

Os minerais, dos quais existem dados, que podem constituir este tipo de rocha são:

- Orthoclase (Feldspato Potássio)
- Albite
- Quartzo
- Biotite

A média dos valores das propriedades térmicas de cada um destes minerais resulta numa condutibilidade térmica de 4,03 [W/m·K].

Este é o único caso para o qual não se dispõe de dados para a capacidade térmica, mas sendo que seus componentes são semelhantes aos do granito, o seu calor específico deve oscilar entre valores próximos.

ANEXO C: Código Base do Modelo Analítico

Procedure **startsistem** (t; t₁ : a)

If [t <= t₁] Then

a := 0

Else

a := 1

EndIf

End **startsistem**

Resolução teórica de um sistema de tubos enterrados

$$t_y^0 = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \quad \text{período anual}$$

$$t_d^0 = 24 \cdot 3600 \quad \text{período diário}$$

$$t_a^* = 15 \cdot 3600 \quad \text{tempo para a temperatura diária do ar mais elevada}$$

$$t_s^* = 13 \cdot 3600 \quad \text{tempo para a temperatura diária da superfície do solo mais elevada}$$

$$\omega_d = 2 \cdot \frac{\pi}{t_d^0} \quad \text{frequência diária}$$

$$\omega_y = 2 \cdot \frac{\pi}{t_y^0} \quad \text{frequência anual}$$

$$t_1 = 0 \cdot 3600 \quad \text{tempo no qual se liga o sistema}$$

$$t = 8 \cdot 3600 \quad \text{tempo medido desde o início do dia}$$

$$t = 3600 \cdot t_h$$

Call **startsistem** [t ; t₁ : a]

$$\text{Horas} = \frac{t}{3600}$$

$$\text{Dias} = \frac{\text{Horas}}{24}$$

$$\Delta T_{s,d} = 4,97 \quad \text{Amplitude da temperatura diária da superfície do solo}$$

$$\Delta T_{a,d} = 6,25 \quad \text{Amplitude da temperatura diária do ar}$$

$$\Delta T_{s,y} = 10 \quad \text{Amplitude da temperatura anual da superfície do solo}$$

$$T_{a,d} = 21,35 \quad \text{Temperatura média diária do ar}$$

$$T_{s,y} = 14 \quad \text{Temperatura média anual da superfície do solo}$$

$$\tau = 0$$

$$\tau_0 = \tau$$

$$\text{Solo\$} = \text{'Granito'}$$

$$p_s = 0,6 \quad \text{Porosidade do solo}$$

$$\phi_{\text{solo}} = 0,4 \quad \text{Humidade relativa do solo}$$

$$\rho_{\text{solo}} = 1800 \quad \text{Densidade do solo}$$

$$b = 4 \quad \text{Profundidade de instalação do sistema de tubos enterrados}$$

$$L = 20 \quad \text{Comprimento dos tubos enterrados}$$

$$d_h = 0,2 \quad \text{Diâmetro hidráulico do tubo enterrado}$$

$$\dot{m} = 0 \quad \text{Caudal mássico que circula no sistema}$$

$$v_{\text{ar}} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot \rho_{\text{ar}} \cdot d_h^2} \quad \text{Velocidade do ar no sistema}$$

$$\lambda_{\text{mineral}} = \text{Lookup} ['K'; 1; \text{Solo\$}] \quad \text{Condutibilidade dos minerais do solo}$$

$$\lambda_{\text{agua}} = k ['Water'; T=15; P=101300] \quad \text{Condutibilidade da água}$$

$$\lambda_{\text{ar}} = k ['Air'; T=15] \quad \text{Condutibilidade do ar}$$

$$\lambda_{\text{solo}} = \lambda_{\text{mineral}} \cdot [1 - p_s] + p_s \cdot [\lambda_{\text{agua}} \cdot \phi_{\text{solo}} + \lambda_{\text{ar}} \cdot (1 - \phi_{\text{solo}})] \quad \text{Condutibilidade do solo}$$

$$cp_{\text{mineral}} = \text{Lookup} ['Cp'; 1; \text{Solo\$}] \quad \text{Capacidade térmica dos minerais do solo}$$

$$cp_{\text{agua}} = Cp ['Water'; T=15; P=101300] \quad \text{Capacidade térmica da água}$$

$$cp_{\text{ar}} = Cp ['Air'; T=15] \quad \text{Capacidade térmica do ar}$$

$$cp_{\text{solo}} = cp_{\text{mineral}} \cdot [1 - p_s] + p_s \cdot [cp_{\text{agua}} \cdot \phi_{\text{solo}} + cp_{\text{ar}} \cdot (1 - \phi_{\text{solo}})] \quad \text{Capacidade térmica do solo}$$

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{solo}}}{\rho_{\text{solo}} \cdot cp_{\text{solo}}} \quad \text{Difusividade térmica do solo}$$

$$Pr = Pr ['Air'; T=T_{s,y}] \quad \text{Nº de Prandtl}$$

$$\rho_{\text{ar}} = \rho ['Air'; T=T_{s,y}; P=101300] \quad \text{Densidade do ar}$$

$$\mu_{\text{ar}} = \text{Visc} ['Air'; T=T_{s,y}] \quad \text{Viscosidade dinâmica do ar}$$

$$Re = \rho_{\text{ar}} \cdot v_{\text{ar}} \cdot \frac{L}{\mu_{\text{ar}}} \quad \text{Nº de Reynolds}$$

$$h_c = 0,5 + 1,2 \cdot \sqrt{|4|} \quad \text{Coeficiente de convecção na superfície do solo}$$

$$\beta = \frac{\lambda_{\text{solo}}}{h_c} \cdot \frac{\pi}{\alpha \cdot t_d^0}$$

$$\varepsilon = \arctan \left[\frac{\beta}{\beta + 1} \right]$$

$$\bar{T}_a = T_{a,d} + \frac{\Delta T_{a,d}}{\omega_d \cdot [t - t_1 \cdot a]} \cdot [\sin(\omega_d \cdot [t - t_a^*]) - \sin(\omega_d \cdot [t_1 - t_a^*])]$$

$$T_{G;b} = T_{s;y} + \Delta T_{s;y} \cdot \exp \left[-\sqrt{\frac{\omega_y}{2 \cdot \alpha}} \cdot b \right] \cdot \cos \left[\omega_y \cdot (t_1 + \tau - \tau_0) - \sqrt{\frac{\omega_y}{2 \cdot \alpha}} \cdot b \right] + \Delta T_{s;d} \\ \cdot \exp \left[-\sqrt{\frac{\omega_d}{2 \cdot \alpha}} \cdot b \right] \cdot \cos \left[\omega_d \cdot (t_1 - t_s^*) - \sqrt{\frac{\omega_d}{2 \cdot \alpha}} \cdot b \right]$$

$$x_i = \text{Lookup} ['Profundidade'; i; 'x'] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 41$$

$$T_{G;i} = T_{s;y} + \Delta T_{s;y} \cdot \exp \left[-\sqrt{\frac{\omega_y}{2 \cdot \alpha}} \cdot x_i \right] \cdot \cos \left[\omega_y \cdot (t + \tau - \tau_0) - \sqrt{\frac{\omega_y}{2 \cdot \alpha}} \cdot x_i \right] + \Delta T_{s;d} \\ \cdot \exp \left[-\sqrt{\frac{\omega_d}{2 \cdot \alpha}} \cdot x_i \right] \cdot \cos \left[\omega_d \cdot (t - t_s^*) - \sqrt{\frac{\omega_d}{2 \cdot \alpha}} \cdot x_i \right] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 41$$

$$T_{solo;i} = T_{G;i} + T_{he;i} \cdot a \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 41$$

$$T_{he;i} = [\bar{T}_a - T_{G;b}] \cdot \left[\text{Erfc} \left(\frac{|b - x_i|}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot [t - t_1 \cdot a]}} \right) - \left(\exp \left[\frac{h_c \cdot (|b - x_i|)}{\lambda_{solo}} + \frac{h_c^2 \cdot \alpha \cdot (t - t_1)}{\lambda_{solo}^2} \right] \right) \right] \\ \cdot \text{Erfc} \left[\frac{|b - x_i|}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot (t - t_1 \cdot a)}} + \frac{h_c \cdot \sqrt{\alpha \cdot (t - t_1 \cdot a)}}{\lambda_{solo}} \right] \\ + \left[\frac{\Delta T_{a;d} \cdot \exp \left(-[|b - x_i|] \cdot \sqrt{\frac{\omega_d}{2 \cdot \alpha}} \right)}{\sqrt{1 + 2 \cdot \beta + 2 \cdot \beta^2}} \right] \cdot \cos \left[\omega_d \cdot (t - t_a^*) - (|b - x_i|) \cdot \sqrt{\frac{\omega_d}{2 \cdot \alpha}} \right. \\ \left. - \varepsilon \right] \quad \text{for } i = 1 \text{ to } 41$$

$$T_w = T_{G;b} + [\bar{T}_a - T_{G;b}] \cdot \left[1 - \left(\exp \left[\frac{h_c^2 \cdot \alpha \cdot (t - t_1)}{\lambda_{solo}^2} \right] \cdot \text{Erfc} \left[\frac{h_c \cdot \sqrt{\alpha \cdot (t - t_1 \cdot a)}}{\lambda_{solo}} \right] \right) \right] \\ + \left[\frac{\Delta T_{a;d}}{\sqrt{1 + 2 \cdot \beta + 2 \cdot \beta^2}} \right] \cdot \cos [\omega_d \cdot (t - t_a^*) - \varepsilon]$$

$$Q_{bp} = \dot{m} \cdot c_{p,ar} \cdot [T_{a;d} - T_w]$$

ANEXO D: Código Base do Modelo Distribuído Monodimensional

BURIED PIPES Y**Programa de simulação de um sistema de arrefecimento por Tubos Enterrados***Procedimento para a distinção do estado on/off do sistema*

Procedure **ventovel** (g; val_{bp}; rug_{tubo}; k_{local}; p_{amb}; v_{ar}; d_{in}; T_{ar}; T_{tubo}; X; ΔP_{tubo}; α_{ar})

$$\lambda_{ar} := k \left['Air' ; T = T_{ar} \right]$$

$$\rho_{ar} := \rho \left['Air' ; T = T_{ar} ; P = p_{amb} \right]$$

$$\mu_{ar} := \text{Visc} \left['Air' ; T = T_{ar} \right] \quad \text{Viscosidade do ar nos tubos}$$

$$Re := \rho_{ar} \cdot v_{ar} \cdot \frac{d_{in}}{\mu_{ar}} \quad \text{Reynolds do escoamento interior nos tubos}$$

$$Pr := Pr \left['Air' ; T = T_{ar} \right] \quad \text{Prandtl do ar nos tubos}$$

If [Re < 2300] Then

$$\bar{v} := 4,36$$

If [(T_{tubo} ≤ T_{ar}) and (Re > 2300)] Then

$$n := 0,3$$

$$\bar{v} := 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$$

If [(T_{tubo} > T_{ar}) and (Re > 2300)] Then

$$n := 0,4$$

$$\bar{v} := 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$$

$$\alpha_{ar} := \frac{\bar{v}}{\bar{v}} \cdot \frac{\lambda_{ar}}{d_{in}}$$

$$f_{atr} := 0,25 \cdot \log^{-2} \left[\frac{rug_{tubo}}{d_{in} \cdot 3,7} + \frac{5,74}{(Re + 1)^{0,9}} \right]$$

$$\Delta P_{tubo} := \frac{v_{ar}^2}{2 \cdot g} \cdot \left[f_{atr} \cdot \frac{X}{d_{in}} + k_{local} \right] + 0,0001$$

End **ventovel**

Procedimento de controlo do ventilador e dos dampers do colector de saída

Procedure **caudal** (Periodo_{sim\$}; Horas; linha; sc; $\dot{m}_{nom}$; $\dot{m}_{min}$; $\dot{m}_{ant}$; T_{out}; T_{amb}; $\dot{m}$; val_{bp}; $\dot{m}_{ar}$)

If [Periodo_{sim\$} = 'Ano'] Then

If [(Horas > 3623) and (Horas < 6552)] Then

If [sc = 0] Then

$$\dot{m}_{ar} := \dot{m}_{min}$$

$$\dot{m} := \dot{m}_{\min}$$

$$val_{bp} := 0$$

Else

$$\dot{m} := \dot{m}_{\text{nom}}$$

If [$T_{\text{out}} \geq T_{\text{amb}}$] Then

$$\dot{m}_{\text{ar}} := \dot{m}_{\min}$$

$$val_{bp} := 0$$

Else

$$\dot{m}_{\text{ar}} := \dot{m}_{\text{nom}}$$

$$val_{bp} := 1$$

EndIf

EndIf

Else

If [$sc = 0$] Then

$$\dot{m}_{\text{ar}} := \dot{m}_{\min}$$

$$\dot{m} := \dot{m}_{\min}$$

$$val_{bp} := 0$$

Else

$$\dot{m} := \dot{m}_{\text{nom}}$$

If [$T_{\text{out}} \leq T_{\text{amb}}$] Then

$$\dot{m}_{\text{ar}} := \dot{m}_{\min}$$

$$val_{bp} := 0$$

Else

$$\dot{m}_{\text{ar}} := \dot{m}_{\text{nom}}$$

$$val_{bp} := 1$$

EndIf

EndIf

EndIf

If [($\text{Periodo}_{\text{sim\$}}$ = 'Dia') or ($\text{Periodo}_{\text{sim\$}}$ = 'Arrefecimento')] Then

If [$sc = 0$] Then

$$\dot{m}_{ar} := \dot{m}_{min}$$

$$\dot{m} := \dot{m}_{min}$$

$$val_{bp} := 0$$

Else

$$\dot{m} := \dot{m}_{nom}$$

If [$T_{out} \geq T_{amb}$] Then

$$\dot{m}_{ar} := \dot{m}_{min}$$

$$val_{bp} := 0$$

Else

$$\dot{m}_{ar} := \dot{m}_{nom}$$

$$val_{bp} := 1$$

EndIf

EndIf

If [Período_{sim} = 'Aquecimento'] Then

If [$sc = 0$] Then

$$\dot{m}_{ar} := \dot{m}_{min}$$

$$\dot{m} := \dot{m}_{min}$$

$$val_{bp} := 0$$

Else

$$\dot{m} := \dot{m}_{nom}$$

If [$T_{out} \leq T_{amb}$] Then

$$\dot{m}_{ar} := \dot{m}_{min}$$

$$val_{bp} := 0$$

Else

$$\dot{m}_{ar} := \dot{m}_{nom}$$

$$val_{bp} := 1$$

EndIf

EndIf

End **caudal**

Procedure **conforto** (Período_{sim}\$; tempo : T_{conf})

If [Período_{sim}\$ = 'Ano'] Then

$$T_{\text{conf}} := \text{Interpolate1} \left[\text{'Interior'; 'Hora'; 'Ano'; 'Hora'} = \frac{\text{tempo}}{3600} \right]$$

Else

If [Período_{sim}\$ = 'Aquecimento'] Then

$$T_{\text{conf}} := \text{Interpolate1} \left[\text{'Interior'; 'Hora'; 'Aquecimento'; 'Hora'} = \frac{\text{tempo}}{3600} \right]$$

Else

If [Período_{sim}\$ = 'Arrefecimento'] Then

$$T_{\text{conf}} := \text{Interpolate1} \left[\text{'Interior'; 'Hora'; 'Arrefecimento'; 'Hora'} = \frac{\text{tempo}}{3600} \right]$$

Else

If [Período_{sim}\$ = 'Dia'] Then

$$T_{\text{conf}} := \text{Interpolate1} \left[\text{'Interior'; 'Hora'; 'Dia'; 'Hora'} = \frac{\text{tempo}}{3600} \right]$$

Else

EndIf

EndIf

EndIf

End **conforto**

Procedimento para calcular as propriedades psicrométricas do ar insuflado

Procedure **psicroinsuf** (val_{bp}; sc; T_{amb}; ω_{amb}; φ_{amb}; h_{amb}; T_{out}; ω_{out}; φ_{out}; h_{out}; T_{ins}; ω_{ins}; φ_{ins}; h_{ins})

If [val_{bp} = 1] Then

$$T_{\text{ins}} := T_{\text{out}}$$

$$\phi_{\text{ins}} := \phi_{\text{out}}$$

$$\omega_{\text{ins}} := \omega_{\text{out}}$$

$$h_{\text{ins}} := h_{\text{out}}$$

Else

If [(val_{bp} = 0) and (sc = 0)] Then

$$T_{\text{ins}} := T_{\text{out}}$$

$$\phi_{ins} := \phi_{out}$$

$$\omega_{ins} := \omega_{out}$$

$$h_{ins} := h_{out}$$

Else

$$T_{ins} := T_{amb}$$

$$\phi_{ins} := \phi_{amb}$$

$$\omega_{ins} := \omega_{amb}$$

$$h_{ins} := h_{amb}$$

EndIf

EndIf

End **psicroinsuf**

Porcedimento para acoplar o periodo de simulação aos dados climáticos

Procedure **tempo**_{clima} (Periodo_{sim}\$: Porto\$, Lisboa\$Faro\$)

If [Periodo_{sim}\$ = 'Ano'] Then

$$\text{Porto\$} := \text{'Porto'}$$

$$\text{Lisboa\$} := \text{'Lisboa'}$$

$$\text{Faro\$} := \text{'Faro'}$$

Else

If [Periodo_{sim}\$ = 'Dia'] Then

$$\text{Porto\$} := \text{'Porto}_{dia}$$

$$\text{Lisboa\$} := \text{'Lisboa}_{dia}$$

$$\text{Faro\$} := \text{'Faro}_{dia}$$

Else

If [Periodo_{sim}\$ = 'Aquecimento'] Then

$$\text{Porto\$} := \text{'Porto}_{aquecimento}$$

$$\text{Lisboa\$} := \text{'Lisboa}_{aquecimento}$$

$$\text{Faro\$} := \text{'Faro}_{aquecimento}$$

Else

If [Periodo_{sim}\$ = 'Arrefecimento'] Then

Porto\$:= 'Porto_{arrefecimento}'

Lisboa\$:= 'Lisboa_{arrefecimento}'

Faro\$:= 'Faro_{arrefecimento}'

Else

EndIf

EndIf

EndIf

End **tempo**_{clima}

DADOS DE ENTRADA DO UTILIZADOR:

Simulação

X = 35 *Comprimento dos tubos enterrados*

Y = 3 *Profundidade dos tubos enterrados*

E = 1,5 *Distância vertical entre tubos*

Z = $N_t \cdot [d_{in} + 2 \cdot e_{tubo}]$ *Largura do sistema (conjunto de tubos paralelos)*

N_t = 2 *Número de tubos*

M = 9 *Número de nós horizontais*

N = 11 *Número de nós verticais*

J = 9 *Número de nós do espaçamento entre tubos*

Periodo_{sim\$} = 'Dia' *Período de simulação*

Δt = 1800 *Intervalo de integração*

Características da localidade

Call **tempo**_{clima} [Periodo_{sim\$} : Porto\$; Lisboa\$; Faro\$]

Localidade\$ = Lisboa\$ *Localidade onde é simulado o sistema*

Solo\$ = 'Areia' *Tipo de solo aplicado*

α_{solo} = 0,8 *Coeficiente de absorção do solo*

ε_{solo} = 0,89 *Emissividade do solo*

ρ_{solo} = 1800 *Massa volúmica do solo*

f = 0,4 · 0,7 *Factor de humidade da superficie do solo *0,7 se solo relvado*

$$p_s = 0,4 \quad \text{Porosidade do solo}$$

$$\phi_{\text{solo}} = 0,6 \quad \text{Humidade do solo}$$

Propriedades do tubo

$$r_{\text{g tubo}} = 0,00004$$

$$k_{\text{local}} = 1,42 \cdot N_t \cdot 3$$

$$\rho_{\text{tubo}} = 1700 \quad \text{Massa volúmica do tubo}$$

$$c_{p \text{ tubo}} = 1000 \quad \text{Capacidade térmica do tubo}$$

$$\lambda_{\text{tubo}} = 1,4 \quad \text{Condutibilidade do tubo}$$

$$e_{\text{tubo}} = 0,042 \quad \text{Espessura da parede do tubo}$$

$$d_{\text{in}} = 0,1 \quad \text{Diâmetro interior do tubo}$$

$$d_{\text{out}} = d_{\text{in}} + 2 \cdot e_{\text{tubo}} \quad \text{Diâmetro exterior do tubo}$$

Dados do Edifício

$$N_{T1} = 0 \quad \text{Número de habitações T1 2}$$

$$N_{T2} = 0 \quad \text{Número de habitações T2 12}$$

$$N_{T3} = 8 \quad \text{Número de habitações T3 16}$$

$$N_{T4} = 0 \quad \text{Número de habitações T4 1}$$

$$\dot{V}_{T1} = \frac{97}{3600} \quad \text{Caudal volúmico necessário para a habitação T1}$$

$$\dot{V}_{T2} = \frac{124}{3600} \quad \text{Caudal volúmico necessário para a habitação T2}$$

$$\dot{V}_{T3} = \frac{155}{3600} \quad \text{Caudal volúmico necessário para a habitação T3}$$

$$\dot{V}_{T4} = \frac{169}{3600} \quad \text{Caudal volúmico necessário para a habitação T4}$$

DADOS CALCULADOS PELO PROGRAMA

Variáveis de integração

$$\text{linha} = 1 + \frac{\text{tempo}}{\Delta t}$$

$$\text{Horas} = \frac{\text{tempo}}{3600} \quad \text{Tempo de simulação em horas}$$

$$\text{Dias} = \frac{\text{tempo}}{3600 \cdot 24} \quad \text{Tempo de simulação em dias}$$

$$\delta_x = \frac{X}{M + 1} \quad \text{Espaço entre nós na direcção horizontal}$$

$$\delta_y = \frac{Y}{N + 1} \quad \text{Espaço entre nós na direcção vertical}$$

$$\delta_{\text{esp}} = \frac{E}{J + 1} \quad \text{Espaço entre nós do intervalo entre tubos}$$

Propriedades do ambiente

$$g = 9,81 \quad \text{Gravidade [m/s}^2\text{]}$$

$$p_{\text{amb}} = 101300 \quad \text{Pressão atmosférica utilizada para o cálculo de propriedades térmicas}$$

$$\sigma = 5,729 \cdot 10^{-8} \quad \text{[W/(m}^2\text{K}^4\text{)] Coeficiente de Stefan-Boltzmann}$$

$$T_{\text{amb}} = \text{Interpolate1} \left[\text{Localidade\$; 'Hora'; 'T}_{\text{ex}}'; \text{'Hora'} = \frac{\text{tempo}}{3600} \right] \quad \text{Temperatura ambiente}$$

$$\phi_{\text{ar}} = \text{Interpolate1} \left[\text{Localidade\$; 'Hora'; 'Phi'; 'Hora'} = \frac{\text{tempo}}{3600} \right] \quad \text{Humidade relativa do ar}$$

$$\phi_{\text{amb}} = \phi_{\text{ar}} \quad \text{Humidade relativa do ar (repetido por questões de nomenclatura)}$$

$$\omega_{\text{amb}} = \omega \left[\text{'AirH2O'}; T = T_{\text{amb}}; R = \phi_{\text{ar}}; P = p_{\text{amb}} \right] \quad \text{Humidade absoluta do ar ambiente}$$

$$h_{\text{amb}} = h \left[\text{'AirH2O'}; T = T_{\text{amb}}; R = \phi_{\text{ar}}; P = p_{\text{amb}} \right] \quad \text{Entalpia do ar na admissão do permutador}$$

$$I_{\text{sol}} = \text{Interpolate1} \left[\text{Localidade\$; 'Hora'; 'Rad.Vert'; 'Hora'} = \frac{\text{tempo}}{3600} \right] \quad \text{Radiação solar total incidente num plano horizontal}$$

$$v_{\text{amb}} = \text{Interpolate1} \left[\text{Localidade\$; 'Hora'; 'Vento'; 'Hora'} = \frac{\text{tempo}}{3600} \right] \quad \text{Velocidade do ar ambiente}$$

$$\rho_{\text{ar}} = \rho \left[\text{'Air'}; T = 15; P = p_{\text{amb}} \right] \quad \text{Massa volúmica do ar}$$

$$\alpha_{\text{sup}} = 0,5 + 1,2 \cdot \sqrt{|v_{\text{amb}}|} \quad \text{Coeficiente de convecção na superfície do solo}$$

Propriedades do solo

$$\lambda_{\text{mineral}} = \text{Lookup} \left[\text{'K'; 1; Solo\$} \right] \quad \text{Condutibilidade da componente mineral}$$

$$\lambda_{\text{ar}} = k \left[\text{'Air'}; T = 15 \right] \quad \text{Condutibilidade do ar no solo}$$

$$\lambda_{\text{agua}} = k \left[\text{'Water'}; T = 15; P = p_{\text{amb}} \right] \quad \text{Condutibilidade da água no solo}$$

$$\lambda_{\text{solo}} = \lambda_{\text{mineral}} \cdot [1 - p_s] + p_s \cdot [\lambda_{\text{agua}} \cdot \phi_{\text{solo}} + \lambda_{\text{ar}} \cdot (1 - \phi_{\text{solo}})] \quad \text{Condutibilidade do solo (combinação das componentes acima)}$$

$$c_{p_{\text{mineral}}} = \text{Lookup} \left[\text{'Cp'; 1; Solo\$} \right] \quad \text{Capacidade térmica da componente mineral}$$

$$c_{p_{\text{ar}}} = c_p \left[\text{'Air'}; T = 15 \right] \quad \text{Capacidade térmica do ar no solo}$$

$$c_{p_{\text{agua}}} = c_p \left[\text{'Water'}; T = 15; P = p_{\text{amb}} \right] \quad \text{Capacidade térmica da água no solo}$$

$$c_{p_{\text{solo}}} = c_{p_{\text{mineral}}} \cdot [1 - p_s] + p_s \cdot [c_{p_{\text{agua}}} \cdot \phi_{\text{solo}} + c_{p_{\text{ar}}} \cdot (1 - \phi_{\text{solo}})] \quad \text{Capacidade térmica do solo (combinação das componentes acima)}$$

Dados do escoamento interior do ar

$$\phi_{out1} = \text{RH} \left[\text{'AirH2O'} ; T = T_{out1} ; W = \omega_{out} ; P = p_{amb} \right] \quad \text{Humidade relativa do ar a saída do permutador}$$

$$\phi_{out2} = \text{RH} \left[\text{'AirH2O'} ; T = T_{out2} ; W = \omega_{out} ; P = p_{amb} \right] \quad \text{Humidade relativa do ar a saída do permutador}$$

$$\phi_{out3} = \text{RH} \left[\text{'AirH2O'} ; T = T_{out3} ; W = \omega_{out} ; P = p_{amb} \right] \quad \text{Humidade relativa do ar a saída do permutador}$$

$$\phi_{out} = \frac{\phi_{out1} + \phi_{out2} + \phi_{out3}}{3}$$

$$\omega_{out} = \omega_{amb} \quad \text{Humidade absoluta do ar a saída do permutador}$$

$$h_{out1} = h \left[\text{'AirH2O'} ; T = T_{out1} ; W = \omega_{out} ; P = p_{amb} \right] \quad \text{Entalpia do ar na saída do permutador}$$

$$h_{out2} = h \left[\text{'AirH2O'} ; T = T_{out2} ; W = \omega_{out} ; P = p_{amb} \right] \quad \text{Entalpia do ar na saída do permutador}$$

$$h_{out3} = h \left[\text{'AirH2O'} ; T = T_{out3} ; W = \omega_{out} ; P = p_{amb} \right] \quad \text{Entalpia do ar na saída do permutador}$$

$$h_{out} = h_{out1} + h_{out2} + h_{out3}$$

$$T_{in} = \frac{T_{in1} + T_{in2} + T_{in3}}{3}$$

$$T_{out} = \frac{T_{out1} + T_{out2} + T_{out3}}{3}$$

$$T_{ar} = \frac{T_{ar1} + T_{ar2} + T_{ar3}}{3}$$

$$v_{ar} = \frac{4 \cdot \dot{m}_{ar}}{\rho_{ar} \cdot N_t \cdot \pi \cdot d_{in}^2} \quad \text{Velocidade do ar nos tubos}$$

$$sc = \text{Interpolate1} \left[\text{'Ventilador'}; \text{'Hora'}; \text{'Controlo'}; \text{'Hora'} = \frac{\text{tempo}}{3600} \right] \quad \text{Sinal de controlo on/off do Ventilador (7-18 horas de serviço)}$$

Coeficiente de convecção no interior dos tubos enterrados

$$\text{Call } \text{ventovel} \left[g ; \text{val}_{bp} ; \text{rug}_{tubo} ; k_{local} ; p_{amb} ; v_{ar} ; d_{in} ; T_{ar} ; T_{tubo} ; X : \Delta P_{tubo} ; \alpha_{ar} \right]$$

Caudal controlado para um ciclo de trabalho e aproveitamento do ar exterior directo

$$\text{Call } \text{caudal} \left[\text{Periodo}_{sim\$} ; \text{Horas} ; \text{linha} ; sc ; \dot{m}_{nom} ; \dot{m}_{min} ; \dot{m}_{ant} ; T_{out} ; T_{amb} : \dot{m} ; \text{val}_{bp} ; \dot{m}_{ar} \right]$$

$$\dot{m}_{ant} = \text{TableValue} \left[\text{Periodo}_{sim\$} ; \text{linha} - 1 ; \text{'m}_{dot;ar}' \right]$$

Dados do Edifício

$$\text{Call } \text{conforto} \left[\text{Periodo}_{sim\$} ; \text{Horas} : T_{conf} \right] \quad \text{Temperatura interior de conforto}$$

$$\dot{m}_{T1} = \rho_{ar} \cdot \dot{V}_{T1} \quad \text{Caudal necessário para a habitação T1}$$

$$\dot{m}_{T2} = \rho_{ar} \cdot \dot{V}_{T2} \quad \text{Caudal necessário para a habitação T2}$$

$$\dot{m}_{T3} = \rho_{ar} \cdot \dot{V}_{T3} \quad \text{Caudal necessário para a habitação T3}$$

$$\dot{m}_{T4} = \rho_{ar} \cdot \dot{V}_{T4} \quad \text{Caudal necessário para a habitação T4}$$

$$\dot{m}_{\min} = \frac{N_{T1} \cdot \dot{m}_{T1} + N_{T2} \cdot \dot{m}_{T2} + N_{T3} \cdot \dot{m}_{T3} + N_{T4} \cdot \dot{m}_{T4}}{3} \quad \text{Caudal nominal do ventilador}$$

$$\dot{m}_{\text{nom}} = 2 \cdot \dot{m}_{\min} \quad \text{Caudal mínimo do ventilador}$$

MODELO DE SIMULAÇÃO:

call modoONOFF(val_{bp};N;rho,tubo;cp,tubo;lambda,tubo;d_{in};e,tubo;X;N;t,alpha,ar1;linha;Periodo,sim\$;DELTA,t;T_{amb};m,ar;cp,ar:T,tubo,s1;T,tubo,i1;T,tubo1 T,out1;T,ar1;T,19+2];T₁₉+1])

Balanço da superfície do solo j=0

$$\rho_{\text{solo}} \cdot c_{p,\text{solo}} \cdot X \cdot \frac{\delta_y}{2} \cdot Z \cdot \left[\frac{T_0 - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_0')}{\Delta t} \right] = Q_{\text{cd}} + Q_{\text{ri}} + Q_{\text{re}} + Q_{\text{cv}} + Q_{\text{ev}}$$

$$Q_{\text{cd}} = \frac{-\lambda_{\text{solo}}}{\delta_y} \cdot X \cdot Z \cdot [T_0 - T_1]$$

$$Q_{\text{ev}} = -0,0168 \cdot f \cdot X \cdot Z \cdot \alpha_{\text{sup}} \cdot [103 \cdot (273,15 + T_0) + 609 - \phi_{\text{ar}} \cdot (103 \cdot [273,15 + T_{\text{amb}}] + 609)]$$

$$Q_{\text{ri}} = \alpha_{\text{solo}} \cdot X \cdot Z \cdot I_{\text{sol}}$$

$$Q_{\text{re}} = -\epsilon_{\text{solo}} \cdot \sigma \cdot X \cdot Z \cdot [(273,15 + T_0)^4 - (273,15 + T_{\text{amb}})^4]$$

$$Q_{\text{cv}} = \alpha_{\text{sup}} \cdot X \cdot Z \cdot [T_{\text{amb}} - T_0]$$

Balanço da zona central do solo

$$\rho_{\text{solo}} \cdot c_{p,\text{solo}} \cdot X \cdot \delta_y \cdot Z \cdot \left[\frac{T_j - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_j')}{\Delta t} \right] = q_j \quad \text{for } j = 1 \text{ to } N$$

$$q_j = \frac{\lambda_{\text{solo}}}{\delta_y} \cdot X \cdot Z \cdot [T_{j+1} + T_{j-1} - 2 \cdot T_j] \quad \text{for } j = 1 \text{ to } N$$

Balanço na superfície inferior

$$\rho_{\text{solo}} \cdot c_{p,\text{solo}} \cdot X \cdot \frac{\delta_y}{2} \cdot Z \cdot \left[\frac{T_j - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_j')}{\Delta t} \right] = -q_j + q_{\text{tubo};s1}$$

for j = N+1 to N+1

$$q_j = \frac{\lambda_{\text{solo}}}{\delta_y} \cdot X \cdot Z \cdot [T_j - T_{j-1}] \quad \text{for } j = N+1 \text{ to } N+1$$

$$q_{\text{tubo};s1} = \frac{\lambda_{\text{tubo}}}{e_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{tubo};s1} - T_j] \quad \text{for } j = N+1 \text{ to } N+1$$

Balanço no tubo na parte superior

$$\rho_{\text{tubo}} \cdot c_{p_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot e_{\text{tubo}} \cdot \pi \cdot N_t \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot \left[\frac{T_{\text{tubo};s1} - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_{\text{tubo};s1}')}{\Delta t} \right] = \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar}1} - T_{\text{tubo};s1}] - \frac{\lambda_{\text{tubo}}}{e_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{tubo};s1} - T_{12}]$$

Balanço no Ar TUBO 1

$$T_{\text{tubo}1} = \frac{T_{\text{tubo};s1} + T_{\text{tubo};i1}}{2}$$

$$T_{\text{amb}} = T_{\text{in}1}$$

$$T_{\text{ar}1} = \frac{T_{\text{in}1} + T_{\text{out}1}}{2}$$

$$\dot{m}_{\text{ar}} \cdot c_{p_{\text{ar}}} \cdot [T_{\text{in}1} - T_{\text{out}1}] = \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar}1} - T_{\text{tubo};s1}] + \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar}1} - T_{\text{tubo};i1}]$$

$$q_{\text{conv}} = \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar}1} - T_{\text{tubo};i1}]$$

Balanço no tubo na parte inferior

$$\rho_{\text{tubo}} \cdot c_{p_{\text{tubo}}} \cdot e_{\text{tubo}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot \left[\frac{T_{\text{tubo};i1} - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_{\text{tubo};i1}')}{\Delta t} \right] = \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar}1} - T_{\text{tubo};i1}] - \frac{\lambda_{\text{tubo}}}{e_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{tubo};i1} - T_{13}]$$

Balanço na superfície superior

$$\rho_{\text{solo}} \cdot c_{p_{\text{solo}}} \cdot \frac{\delta_{\text{esp}}}{2} \cdot X \cdot Z \cdot \left[\frac{T_j - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_j')}{\Delta t} \right] = q_{\text{tubo};i1} - q_j$$

for j = N+2 to N+2

$$q_j = \frac{\lambda_{\text{solo}}}{\delta_{\text{esp}}} \cdot X \cdot Z \cdot [T_j - T_{j+1}] \quad \text{for } j = N+2 \text{ to } N+2$$

$$q_{\text{tubo};i1} = \frac{\lambda_{\text{tubo}}}{e_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{tubo};i1} - T_j] \quad \text{for } j = N+2 \text{ to } N+2$$

Balanço da zona central do solo

$$\rho_{\text{solo}} \cdot c_{p_{\text{solo}}} \cdot \delta_{\text{esp}} \cdot X \cdot Z \cdot \left[\frac{T_j - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_j')}{\Delta t} \right] = q_j \quad \text{for } j = N+3 \text{ to } N+J$$

$$q_j = \frac{\lambda_{\text{solo}}}{\delta_{\text{esp}}} \cdot X \cdot Z \cdot [T_{j+1} + T_{j-1} - 2 \cdot T_j] \quad \text{for } j = N+3 \text{ to } N+J$$

Balanço na superfície inferior

$$\rho_{\text{solo}} \cdot c_{p_{\text{solo}}} \cdot X \cdot \frac{\delta_{\text{esp}}}{2} \cdot Z \cdot \left[\frac{T_j - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_j')}{\Delta t} \right] = -q_j + q_{\text{tubo};s2}$$

for j = N+J+1 to N+J+1

$$q_j = \frac{\lambda_{\text{solo}}}{\delta_{\text{esp}}} \cdot X \cdot Z \cdot [T_j - T_{j-1}] \quad \text{for } j = N+J+1 \text{ to } N+J+1$$

$$q_{\text{tubo};s2} = \frac{\lambda_{\text{tubo}}}{e_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{tubo};s2} - T_j] \quad \text{for } j = N+J+1 \text{ to } N+J+1$$

Balanço no tubo na parte superior

$$\rho_{\text{tubo}} \cdot c_{p_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot e_{\text{tubo}} \cdot \pi \cdot N_t \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot \left[\frac{T_{\text{tubo};s2} - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_{\text{tubo};s2}')}{\Delta_t} \right] = \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar}2} - T_{\text{tubo};s2}] - \frac{\lambda_{\text{tubo}}}{e_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{tubo};s2} - T_{21}]$$

Balanço no Ar TUBO 2

$$T_{\text{tubo}2} = \frac{T_{\text{tubo};s2} + T_{\text{tubo};i2}}{2}$$

$$T_{\text{amb}} = T_{\text{in}2}$$

$$T_{\text{ar}2} = \frac{T_{\text{in}2} + T_{\text{out}2}}{2}$$

$$\dot{m}_{\text{ar}} \cdot c_{p_{\text{ar}}} \cdot [T_{\text{in}2} - T_{\text{out}2}] = \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar}2} - T_{\text{tubo};s2}] + \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar}2} - T_{\text{tubo};i2}]$$

Balanço no tubo na parte inferior

$$\rho_{\text{tubo}} \cdot c_{p_{\text{tubo}}} \cdot e_{\text{tubo}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot \left[\frac{T_{\text{tubo};i2} - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_{\text{tubo};i2}')}{\Delta_t} \right] = \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar}2} - T_{\text{tubo};i2}] - \frac{\lambda_{\text{tubo}}}{e_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{tubo};i2} - T_{22}]$$

Balanço na superfície superior

$$\rho_{\text{solo}} \cdot c_{p_{\text{solo}}} \cdot \frac{\delta_{\text{esp}}}{2} \cdot X \cdot Z \cdot \left[\frac{T_j - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_j')}{\Delta_t} \right] = q_{\text{tubo};i2} - q_j$$

for j = N+J+2 to N+J+2

$$q_j = \frac{\lambda_{\text{solo}}}{\delta_{\text{esp}}} \cdot X \cdot Z \cdot [T_j - T_{j+1}] \quad \text{for } j = N+J+2 \text{ to } N+J+2$$

$$q_{\text{tubo};i2} = \frac{\lambda_{\text{tubo}}}{e_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{tubo};i2} - T_j] \quad \text{for } j = N+J+2 \text{ to } N+J+2$$

Balanço da zona central do solo

$$\rho_{\text{solo}} \cdot c_{p_{\text{solo}}} \cdot \delta_{\text{esp}} \cdot X \cdot Z \cdot \left[\frac{T_j - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_j')}{\Delta_t} \right] = q_j \quad \text{for } j = N+J+3 \text{ to } N+2*J$$

$$q_j = \frac{\lambda_{\text{solo}}}{\delta_{\text{esp}}} \cdot X \cdot Z \cdot [T_{j+1} + T_{j-1} - 2 \cdot T_j] \quad \text{for } j = N+J+3 \text{ to } N+2*J$$

Balanço na superfície inferior

$$\rho_{\text{solo}} \cdot c_{p_{\text{solo}}} \cdot X \cdot \frac{\delta_{\text{esp}}}{2} \cdot Z \cdot \left[\frac{T_j - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_j')}{\Delta_t} \right] = -q_j + q_{\text{tubo;s3}}$$

for j = N+2*J+1 to N+2*J+1

$$q_j = \frac{\lambda_{\text{solo}}}{\delta_{\text{esp}}} \cdot X \cdot Z \cdot [T_j - T_{j-1}] \quad \text{for } j = N+2*J+1 \text{ to } N+2*J+1$$

$$q_{\text{tubo;s3}} = \frac{\lambda_{\text{tubo}}}{e_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{tubo;s3}} - T_j] \quad \text{for } j = N+2*J+1 \text{ to } N+2*J+1$$

Balanço no tubo na parte superior

$$\rho_{\text{tubo}} \cdot c_{p_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot e_{\text{tubo}} \cdot \pi \cdot N_t \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot \left[\frac{T_{\text{tubo;s3}} - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_{\text{tubo;s3}}')}{\Delta_t} \right] = \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar3}} - T_{\text{tubo;s3}}] - \frac{\lambda_{\text{tubo}}}{e_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{tubo;s3}} - T_{30}]$$

Balanço no Ar TUBO 3

$$T_{\text{tubo3}} = \frac{T_{\text{tubo;s3}} + T_{\text{tubo;i3}}}{2}$$

$$T_{\text{amb}} = T_{\text{in3}}$$

$$T_{\text{ar3}} = \frac{T_{\text{in3}} + T_{\text{out3}}}{2}$$

$$\dot{m}_{\text{ar}} \cdot c_{p_{\text{ar}}} \cdot [T_{\text{in3}} - T_{\text{out3}}] = \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar3}} - T_{\text{tubo;s3}}] + \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar3}} - T_{\text{tubo;i3}}]$$

Balanço no tubo na parte inferior

$$\rho_{\text{tubo}} \cdot c_{p_{\text{tubo}}} \cdot e_{\text{tubo}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot \left[\frac{T_{\text{tubo;i3}} - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_{\text{tubo;i3}}')}{\Delta_t} \right] = \alpha_{\text{ar}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{ar3}} - T_{\text{tubo;i3}}] - \frac{\lambda_{\text{tubo}}}{e_{\text{tubo}}} \cdot X \cdot N_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{in}}}{2} \cdot [T_{\text{tubo;i3}} - T_{31}]$$

Balanço na superfície superior

$$\rho_{\text{solo}} \cdot c_{p_{\text{solo}}} \cdot \frac{\delta_{\text{esp}}}{2} \cdot X \cdot Z \cdot \left[\frac{T_j - \text{TableValue}(\text{Periodo}_{\text{sim\$}}; \text{linha} - 1; 'T_j')}{\Delta_t} \right] = q_{\text{tubo;i3}} - q_j$$

for j = N+2*J+2 to N+2*J+2

Balanço da zona central do solo

Balanço do limite final do solo $j=2*N+2*J+1$

$$q_j = \frac{\lambda_{\text{solo}}}{\delta_v} \cdot X \cdot Z \cdot [\tau_{j-1} - \tau_j] \quad \text{for } j = 2*N+2*J+1 \text{ to } 2*N+2*J+1$$

INTERLIGAÇÃO COM O EDIFÍCIO

Potência do Ventilador

$$\Delta P_{ed} = 0$$

$$\dot{W}_{\text{vent}} = q \cdot \dot{m} \cdot 3 \cdot [\Delta P_{\text{tubo}} + \Delta P_{\text{ed}}]$$

Potência Transferida, COP e Eficiência

$$T_{\text{tubo}} = \frac{T_{\text{tubo1}} + T_{\text{tubo2}} + T_{\text{tubo3}}}{3}$$

$$Q_{bp} = \dot{m} \cdot val_{bp} \cdot 3 \cdot cp_{ar} \cdot [T_{out} - T_{in}]$$

$$Q_{\text{sist}} = \dot{m} \cdot 3 \cdot [h_{\text{ins}} - h_{\text{amb}}]$$

$$\varepsilon_{bp} = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{tubo}}$$

$$\varepsilon_{\text{sist}} = \frac{T_{\text{amb}} - T_{\text{ins}}}{T_{\text{amb}} - T_{\text{tubo}}}$$

$$\text{COP}_{\text{bp}} = \frac{|Q_{\text{bp}}|}{\dot{W}_{\text{vent}}}$$

$$\text{COP}_{\text{sist}} = \frac{|Q_{\text{sist}}|}{\dot{W}_{\text{vent}}}$$

Comportamento do sistema numa sala

Call **psicroinsuf** [val_{bp} ; sc ; T_{amb} ; ω_{amb} ; φ_{amb} ; h_{amb} ; T_{out} ; ω_{out} ; φ_{out} ; h_{out} : T_{ins} ; ω_{ins} ; φ_{ins} ; h_{ins}]

$$Q_{ed} = \dot{m} \cdot 3 \cdot c_{p_{ar}} \cdot [T_{conf} - T_{ins}]$$