



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

**Monitorização da temperatura do solo.
Desenvolvimento e estudo experimental de um
permutador de calor ar-solo**

Anthony Calado

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires
Co-orientador: Prof. Doutor Luís Manuel Ferreira Gomes

Covilhã, outubro de 2016

Agradecimentos

A realização deste trabalho marca o fim de uma importante etapa da minha vida. Neste sentido, gostaria de expressar a minha profunda gratidão àqueles cujo esforço contribuiu de forma decisiva para a sua concretização.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores, Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires e o Professor Doutor Luís Manuel Ferreira Gomes, pela amizade, confiança, disponibilidade, orientação e incentivos, que certamente foram decisivos para que este trabalho tenha chegado a bom termo. Agradeço-lhes, ainda, todo o conhecimento que me transmitiram ao longo deste meu término académico.

Agradeço ao Sr. João Correia, técnico do Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor da Universidade da Beira Interior, e ao Sr. Luciano Rato, técnico do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, por todos os conselhos, disponibilidade e auxílio prestado durante a fase de construção e implementação do trabalho.

Aos meus amigos e colegas do curso que contribuíram, direta ou indiretamente, para o meu sucesso académico, expresso-lhes um especial agradecimento.

Por último, mas em primeiro, manifesto um eterno reconhecimento aos meus pais, por todos os sacrifícios que fizeram para me facultar esta experiência transbordada de sabedoria e momentos inesquecíveis. À minha irmã, ao meu cunhado e ao meu querido sobrinho, agradeço-lhes todo o positivismo concedido, particularmente, nos maus momentos. E à Jéssica, minha namorada, que sempre me motivou e acreditou em mim, mesmo quando a distancia física perdurava semanas.

Aqui lhes deixo uma palavra de gratidão muito especial, por todo amor e pela forma como durante estes anos souberam, tão bem, ajudar-me.

Resumo

O aproveitamento da energia geotérmica de muito baixa entalpia mediante a utilização de tubos enterrados no solo tem sido visto como uma estratégia capaz de contribuir para a poupança de energia no setor dos edifícios. No presente trabalho é proposto um permutador de calor ar-solo, de formato inovador e compacto, como estratégia de arrefecimento. Adicionalmente, é proposta a monitorização da temperatura do solo em três localizações diferentes, todas na cidade da Covilhã. Assim, o trabalho agora apresentado incluiu o desenvolvimento, a construção e a implementação, quer do permutador de calor, quer das sondas de temperatura, e a realização de estudos experimentais em ambos. De forma sucinta, o permutador apresenta um circuito de tubagem em formato helicoidal quadrangular, em PVC, que possui uma entrada e uma saída de ar à superfície e em que a circulação de ar nos tubos é efetuada com recurso a um, ou dois, ventiladores hélico-centrífugos aplicados nas respetivas bocas de admissão e extração de ar. Relativamente às sondas, estas envolvem cinco pontos de medida, os quais permitem a monitorização da temperatura do solo, metro a metro, até os 5 metros de profundidade. Após a construção destes elementos, foram implementados nas localizações estabelecidas, em que, posteriormente, foram submetidos a um conjunto de estudos experimentais que visaram, por um lado, conhecer o desempenho térmico e energético do permutador na estação de arrefecimento (verão) e, por outro, analisar o padrão apresentado pela temperatura do solo nas três localizações seleccionadas. Os resultados do estudo relativo ao permutador revelam que este possui potencialidades para o arrefecimento de edifícios. Os dados obtidos da monitorização da temperatura do solo, mostram temperaturas adequadas, quer para o arrefecimento, quer para aquecimento do ar interior de edifícios.

Palavras-chave

Energia geotérmica, Energia geotérmica de muito baixa entalpia, Arrefecimento e aquecimento pelo solo, Permutador de calor ar-solo.

Abstract

The use of geothermal energy of very low enthalpy through the use of pipes buried in the ground, has been seen as a strategy to contribute to energy conservation in the sector of buildings. In this paper it is proposed an air-ground heat exchanger, with innovative and compact design, as cooling strategy. In addition, it is proposed to monitor the soil temperature at three different locations, all in the city of Covilhã. Thus, the work now presented includes the development, construction and implementation of both the heat exchanger and the temperature sensors, and the realization of experimental studies on both. Briefly, the heat exchanger has a helical quadrangular pipe circuit, made of PVC, having an inlet and an air outlet at the ground surface, which air circulation in the tubes is effected using one or two helical-centrifugal fans, applied in the respective mouths of intake and extraction of the air. Regarding the probes, these involve five measurement points, which allow monitoring of soil temperature, meter by meter, up to 5 meters deep. After construction, these elements were implemented in the set locations, which subsequently underwent a series of experimental studies aimed to meet the thermal and energy performance of the heat exchanger in the cooling season (summer) and, analyze the pattern shown by soil temperatures in the three selected locations. The results of the studies show that the heat exchanger has the potential for the cooling of buildings. The data obtained by the temperature monitoring of the soil, show suitable temperatures for cooling and heating the indoor air of buildings.

Keywords

Geothermal energy, Very low enthalpy geothermal energy, Heating and cooling from soil, Earth to Air Heat Exchanger.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas	xxi
Lista de Símbolos.....	xxiii
Lista de Acrónimos	xxiv
1. Introdução	1
1.1. Perspetiva geral	2
1.2. O problema em estudo e a sua relevância.....	4
1.3. Revisão bibliográfica	6
1.3.1. Trabalhos relacionados com o arrefecimento e aquecimento pelo solo por contacto indireto.....	7
1.3.2. Trabalhos relacionados com a aplicação de permutadores de calor ar-solo	12
1.3.3. Trabalhos relacionados com a combinação de permutadores de calor ar-solo com outros sistemas (sistemas híbridos)	15
1.3.4. Trabalhos relacionados com o arrefecimento pelo solo por contacto direto....	18
1.4. Objetivos e contribuição da presente dissertação	19
1.5. Visão geral da organização da dissertação	20
2. O solo enquanto fonte térmica	23
2.1. Considerações iniciais.....	23

2.2.	Mecanismos de transferência de calor no solo	26
2.2.1.	Transferência de calor por condução	27
2.2.2.	Transferência de calor por convecção	27
2.2.3.	Transferência de calor por radiação.....	28
2.3.	Propriedades térmicas dos solos	30
2.3.1.	Condutibilidade térmica	30
2.3.2.	Resistividade térmica	33
2.3.3.	Capacidade térmica	33
2.3.3.1.	Calor específico.....	34
2.3.3.2.	Calor específico volumétrico	36
2.3.4.	Difusividade térmica	37
2.4.	Regime térmico do solo.....	39
2.5.	Análises granulométricas	43
2.6.	Nota conclusiva	46
3.	Arrefecimento e aquecimento pelo solo	47
3.1.	Energia geotérmica	48
3.1.1.	Energia geotérmica de alta entalpia	49
3.1.2.	Energia geotérmica de baixa entalpia.....	51
3.1.3.	Energia geotérmica de muito baixa entalpia	52
3.2.	Arrefecimento e aquecimento pelo solo.....	54
3.2.1.	Princípio de funcionamento e tipos de configuração dos permutadores de calor ar-solo.....	57
3.2.2.	Parâmetros e fatores influentes no desempenho de permutadores de calor ar-solo	61

3.2.3.	Vantagens e desvantagens da sua utilização	64
3.2.4.	Análise energética	66
3.3.	Aplicações em Portugal	68
3.3.1.	Edifício Oásis.....	68
3.3.2.	Edifício Borboleta	69
3.3.3.	Edifício Solar XXI	70
3.3.4.	Edifício Porto Santo.....	71
3.4.	Nota conclusiva.....	73
4.	Unidades experimentais.....	74
4.1.	Permutador de calor ar-solo	74
4.1.1.	Descrição do permutador	75
4.1.1.1.	Especificações do permutador	76
4.1.2.	Construção do permutador	78
4.1.3.	Implementação do permutador.....	84
4.2.	Sondas de medição da temperatura do solo	87
4.2.1.	Descrição das sondas	88
4.2.2.	Construção das sondas	88
4.2.3.	Implementação das sondas	90
4.3.	Equipamentos auxiliares	94
4.3.1.	Sistema de ventilação	94
4.3.2.	Sistema de medição da temperatura	95
4.3.3.	Escudo para sonda de medição da temperatura do ar exterior	96
4.3.4.	Sistema de medição da velocidade	97

4.4.	Nota conclusiva	98
5.	Estudo Experimental	99
5.1.	Estudos realizados	99
5.1.1.	Monitorização da temperatura do solo	99
5.1.2.	Permutador de calor ar-solo	101
5.2.	Resultados e discussão	102
5.2.1.	Monitorização da temperatura do solo	103
5.2.1.1.	Monitorização semanal da temperatura do solo no local B	103
5.2.1.2.	Monitorização semanal da temperatura do solo no local C	107
5.2.1.3.	Monitorização semanal da temperatura do solo no local D	111
5.2.1.4.	Análise comparativa das três localizações	115
5.2.2.	Monitorização da temperatura do solo ao longo de 24 horas	115
5.2.3.	Permutador de calor ar-solo	117
5.2.3.1.	Varição da temperatura do ar no permutador ao longo de 24 horas ...	118
5.2.3.2.	Varição da potência (instantânea) de arrefecimento do permutador ao longo de 24 horas	120
5.2.3.3.	Varição da diferença de temperatura ($T_{amb} - T$) ao longo do comprimento do permutador	122
5.2.3.4.	Varição da potência de arrefecimento ao longo dos ensaios realizados	124
5.2.3.5.	Varição do <i>COP</i> ao longo dos ensaios realizados	126
5.2.4.	Nota conclusiva.....	127
6.	Conclusão	130
6.1.	Recapitulação	130

6.2. Trabalho Futuro	132
Referências bibliográficas.....	134

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Dimensão dos diferentes tipos de partículas sólidas no solo. Adaptado de Society (2005).	24
Figura 2.2 - Representação esquemática do triangulo de Feret envolvendo as possíveis combinações, em percentagem, de areia, argila e silte. Adaptado Nunes (2010) <i>in</i> Figueira (2015).	25
Figura 2.3 - Mecanismos de transferência de calor nos solos. Adaptado de Johansen (1975) <i>in</i> Alrtimi et al. (2016).	29
Figura 2.4 - Esquematização do aumento do conteúdo de água num meio poroso. Adaptado de Roth (2012).	31
Figura 2.5 - Efeito do grau de saturação na condutibilidade térmica de diferentes tipos de solos. Adaptado de Barry-Macaulay et al. (2013).	31
Figura 2.6 - Efeito do aumento do conteúdo de água no calor específico de um solo argiloso e um solo arenoso, para uma massa específica de 1300 kg/m ³ . Adaptado de Abu-Hamdeh (2003).	35
Figura 2.7 - Variação do calor específico volumétrico de um solo argiloso e um solo arenoso em função do conteúdo de água e da massa específica. Adaptado de Alnefaie & Abu-Hamdeh (2013).	36
Figura 2.8 - Variação da difusividade térmica com o conteúdo de água para dois tipos solos (arenosos e argilosos). Adaptado de Abu-Hamdeh (2003).	38
Figura 2.9 - Variação diária da temperatura do solo para várias profundidades e para um dia típico de verão. Adaptado de Chesworth et al. (2016).	40
Figura 2.10 - Variações sazonais de temperatura em várias profundidades, observado em Oxford (Reino Unido) em 1899 por Rambaut (1900) <i>in</i> Banks (2008).	41
Figura 2.11 - Variação da temperatura da superfície de um solo sem tratamento (descoberto) e um solo com relva. Adaptado de Ahmed et al. (2016).	42
Figura 2.12 - Fotografia das quatro amostras de solos antes da sua preparação.....	43
Figura 2.13 - Fotografias relativas ao procedimento de preparação das amostras (secagem e pesagem).	44

Figura 2.14 - Fotografia dos peneiros empregues para a realização das análises granulométricas.	44
Figura 2.15 - Fotografias relativas ao processo de peneiração efetuado para uma das amostras em estudo e da distribuição do material obtido nos alusivos peneiros.	45
Figura 2.16 - Curvas granulométricas representativas das quatro amostras.	45
Figura 3.1 - Repartição das temperaturas das ocorrências termais em Portugal Continental. Adaptado de Lourenço & Cruz (2006).	51
Figura 3.2 - Esquema relativo ao perfil da temperatura do solo mediante o efeito das variações sazonais das condições meteorológicas e do fluxo de calor geotérmico (Banks, 2008).	53
Figura 3.3 - Arrefecimento/aquecimento pelo solo por contacto direto a) parcial e b) integral.	56
Figura 3.4 - Conceito de sistemas híbridos. Adaptado de Soni et al. (2016).	57
Figura 3.5 - Esquema ilustrativo de um permutador de calor ar-solo em circuito fechado. ...	58
Figura 3.6 - Esquema ilustrativo de permutadores de calor, em circuito fechado, do tipo horizontal: a) em série, b) em andares, c) paralelo, d) espiral. Adaptado de Florides & Kalogirou (2007).	59
Figura 3.7 - Esquema ilustrativo de permutadores de calor, em circuito fechado, do tipo vertical: a) em “U” e b) helicoidal. Adaptado de Florides & Kalogirou (2007).	60
Figura 3.8 - Esquema ilustrativo de um permutador de calor ar-solo em circuito aberto.	60
Figura 3.9 - Estratégia para remover a acumulação de condensados (inclinação dos tubos), adaptado de Vlad et al. (2011).	66
Figura 3.10 - Princípio de funcionamento do sistema Coolhouse em modo de: a) arrefecimento (Verão) e b) aquecimento (Inverno). Adaptado de Burton (2004).	69
Figura 3.11 - Implementação do permutador de calor na ‘Casa Borboleta’ (Gonçalves & Nascimento, 2004).	70
Figura 3.12 -Esquemática do permutador de calor ar-solo do edifício Solar XXI. Adaptado de INETI (2005).	71
Figura 3.13 - Pormenores da instalação da tubagem (manilhas de cimento). Adaptado de INETI (2005).	71

Figura 3.14 - Pormenores da instalação da tubagem (manilhas de cimento). Adaptado de Gomes (2010).	72
Figura 3.15 - Pormenores relativos a localização das bocas de admissão de ar (à esquerda) e das bocas de saída para o interior do edifício (à direita). Adaptado de Gomes (2010).	72
Figura 4.1 - Esquema exemplificativo, realizado em SolidWorks™, do permutador de calor ar-solo proposto.	75
Figura 4.2 - Fotografia do processo de corte dos tubos.....	78
Figura 4.3 - Fotografia relativa à fixação do primeiro patamar (base) do permutador.	78
Figura 4.4 - Fotografias relativas aos espaçadores e respectiva construção.	79
Figura 4.5 - Fotografia da montagem dos cinco patamares do permutador.	80
Figura 4.6 - Localização dos termopares ao longo do permutador.....	81
Figura 4.7 - Pormenores da instrumentação do permutador.	82
Figura 4.8 - Vista isométrica do permutador (dimensões em milímetros).	82
Figura 4.9 - Vista lateral do permutador (dimensões em milímetros).....	83
Figura 4.10 - Vista inferior do permutador (dimensões em milímetros).	83
Figura 4.11 - Localização geográfica do permutador.....	84
Figura 4.12 - Fotografia do permutador e do processo de escavação do buraco.	85
Figura 4.13 - Pormenores do nivelamento dos patamares.	85
Figura 4.14 - Enterro do permutador e sua conclusão.	86
Figura 4.15 - Fotografia dos tubos de admissão (em baixo) e extração de ar (em cima).	87
Figura 4.16 - Fotografia do invólucro protetor contruído para proteção das bocas do permutador.	87
Figura 4.17 - Fotografia da primeira sonda desenvolvida para a monitorização da temperatura do solo (instantes antes da sua implementação).....	88
Figura 4.18 - Descrição e esquematização da sonda.	89
Figura 4.19 - Pormenores da aplicação de um apoio metálico.	90

Figura 4.20 - Localização geográfica das três sondas implementadas.	90
Figura 4.21 - Equipamento PAGANI TG-63/100.....	91
Figura 4.22 - Componentes e acessórios do PAGANI, TG-63/100.....	92
Figura 4.23 - Fotografia relativa à recolha da amostra do solo A.	93
Figura 4.24 - Implementação das sondas nos respetivos locais.....	93
Figura 4.25 - Ventilador TD-250/100 T (S&P).....	94
Figura 4.26 - Fotografia de um dos ensaios realizados com dois ventiladores.....	95
Figura 4.27 - Data logger PCE-T 1200 (PCE instruments).	95
Figura 4.28 - Escudo para sonda de medição da temperatura do ar ambiente.....	96
Figura 4.29 - Anemómetro de hélice Testo 416.	97
Figura 4.30 - Exemplificação do posicionamento do anemómetro através do suporte desenvolvido.....	98
Figura 5.1 - Padrão da temperatura do solo e da temperatura medida no exterior do local B entre 14 de dezembro de 2015 e 3 de outubro de 2016.	105
Figura 5.2 - Amplitude térmica do local B entre 14 de dezembro de 2015 e 3 de outubro de 2016.	106
Figura 5.3 - Padrão da temperatura do solo e da temperatura medida no exterior do local C entre 8 de fevereiro e 3 de outubro de 2016.	109
Figura 5.4 - Amplitude térmica do local C entre 8 de fevereiro e 3 de outubro de 2016.....	110
Figura 5.5 - Padrão da temperatura do solo e da temperatura medida no exterior do local C entre 11 de abril e 3 de outubro de 2016.	113
Figura 5.6 - Amplitude térmica do local C entre 11 de abril e 3 de outubro de 2016.....	114
Figura 5.7 - Variação da temperatura exterior e do solo no local B entre o dia 2 e 3 de fevereiro de 2016.	116
Figura 5.8 - Variação da temperatura exterior e do solo no local D entre o dia 23 e 24 de agosto de 2016.	117

Figura 5.9 - Variação da temperatura exterior e do solo no local C entre o dia 21 e 22 de junho de 2016.	117
Figura 5.10 - Variação da temperatura medida no exterior e do ar ao longo do permutador entre os dias 2 e 3 de junho de 2016.	119
Figura 5.11 - Variação da temperatura medida no exterior e do ar ao longo do permutador entre os dias 30 e 31 de agosto de 2016.	119
Figura 5.12 - Variação da potência de arrefecimento e COP do permutador entre os dias 7 e 8 de junho de 2016 (para Q1 e COP1 - 27,9 m ³ /h), e, 8 e 9 de junho de 2016 (para Q2 e COP2 - 53,1 m ³ /h).	121
Figura 5.13 - Variação da potência de arrefecimento e COP do permutador nos dias 25 e 26 de julho de 2016 (para Q1 e COP1 - 27,9 m ³ /h), e, 28 e 29 de julho de 2016 (para Q2 e COP2 - 53,1 m ³ /h).	121
Figura 5.14 - Diferença entre a temperatura medida no exterior e a temperatura ao longo do permutador (instante em que $T_{amb} - T_E$ é máximo) referente ao ensaio 9 (para 27,9 m ³ /h) e ao ensaio 10 (para 51,3 m ³ /h).....	123
Figura 5.15 - Diferença entre a temperatura medida no exterior e a temperatura ao longo do permutador (valores médios no intervalo 9:00 - 18:00) alusivo ao ensaio 6 (para 27,9 m ³ /h) e ao ensaio 7 (para 51,3 m ³ /h).	123
Figura 5.16 - Variação da potência de arrefecimento instantânea máxima do permutador de calor (instante em que $T_{amb} - T_E$ é máximo) ao longo dos ensaios realizados.	125
Figura 5.17 - Variação da potência de arrefecimento média do permutador de calor (valores médios no intervalo 9:00 - 18:00) ao longo dos ensaios realizados.	125
Figura 5.18 - Variação do COP instantâneo do permutador de calor (instante em que $T_{amb} - T_E$ é máximo) ao longo dos ensaios realizados.....	126
Figura 5.19 - Variação do COP médio do permutador de calor (valores médios no intervalo 9:00 - 18:00) ao longo dos ensaios realizados.....	127

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Condutibilidade térmica de alguns tipos de solo, minerais e outros constituintes. Adaptado de ^(*) McCorry & Jones (2011), segundo a norma alemã VDI 4640, ^(**) Banks (2008) e ^(***) Hillel (1982).	33
Tabela 2.2 - Calor específico de alguns tipos de solo, minerais e outros constituintes. Adaptado de ^(*) McCorry & Jones (2011), segundo a norma alemã VDI 4640, ^(**) Rees et al. (2000) e ^(***) Farouki (1981).	35
Tabela 2.3 - Calor específico volumétrico de alguns tipos de solo e minerais. Adaptado de ^(*) McCorry & Jones (2011), segundo a norma alemã VDI 4640, e ^(**) Banks (2008).	37
Tabela 2.4 - Difusividade térmica de alguns tipos de solo e minerais. Adaptado de ^(*) McCorry & Jones (2011), segundo a norma alemã VDI 4640, e ^(**) Banks (2008).	39
Tabela 2.5 - Efeito do tipo de solo na amplitude térmica diária a diferentes profundidades. Adaptado de Baver et al. (1972) in Chesworth et al. (2016).	42
Tabela 3.1 - Classificação dos recursos geotérmicos de acordo com a temperatura do fluido segundo vários autores, referências a) a e) in Rocha (2011).	49
Tabela 4.1 - Características geométricas, físicas e térmicas dos tubos e acessórios em PVC.	77
Tabela 4.2 - Tabela resumo das especificações do permutador.	77
Tabela 4.3 - Distância entre cada ponto de medição ao longo do permutador e as profundidades associadas.	81
Tabela 5.1 - Data da monitorização da temperatura do solo ao longo de 24 horas nas localizações B, C e D.	100
Tabela 5.2 - Caudal de ar e data associada a cada ensaio.	102
Tabela 5.3 - Sinopse da temperatura medida no exterior e da temperatura do solo no local B desde de 14 de dezembro de 2015 a 3 de outubro de 2016.	107
Tabela 5.4 - Sinopse da temperatura medida no exterior e da temperatura do solo no local C desde de 8 de fevereiro de 2016 a 3 de outubro de 2016	111
Tabela 5.5 - Sinopse da temperatura medida no exterior e da temperatura do solo no local D desde de 11 de abril de 2016 e 3 de outubro de 2016.	112

Tabela 5.6 - Dados obtidos dos ensaios de 24 horas (temperatura do ar, c_p e ρ). 120

Lista de Símbolos

c_p	Calor específico a pressão constante	kJ/kgK
d	Diâmetro	m
\dot{m}	Caudal mássico	kg/s
\dot{Q}	Potência térmica	kW
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
v	Velocidade	m^2/s
\dot{W}	Potência eléctrica	kW

Símbolos Gregos

ρ	Massa específica	kg/m^3
--------	------------------	-----------------

Índices Inferiores

Amb	Ambiente
E	Localização E do permutador
c	Arrefecimento
h	Aquecimento

Lista de Acrónimos

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado
BP	British Petroleum
CFD	Computational fluid dynamics
<i>COP</i>	Coefficiente of Performance (Coeficiente de Desempenho)
EAHE	Earth to Air Heat Exchanger
EIA	U.S. Energy Information Administration
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PVC	Policloreto de vinilo
TRNSYS	Transient System Simulation
UBI	Universidade da Beira Interior
UE	União Europeia

Capítulo 1

1. Introdução

Nos dias de hoje é notória a importância do setor energético no desenvolvimento económico de um país e no padrão de vida da sociedade, nomeadamente na satisfação das suas necessidades de conforto. Mediante o presente paradigma do crescente aumento do consumo energético mundial, assim como dos problemas ambientais associados à sua produção por fontes de energias tradicionais, tornou-se imperativo e urgente encontrar fontes alternativas, eficazes e limpas, capazes de substituir a energia proveniente de combustíveis fósseis ou pelo menos mitigar o seu consumo generalizado.

Do conjunto dos sectores económicos, uma parcela significativa do consumo global de energia ocorre nos edifícios. Em virtude do crescimento da população, do aumento dos padrões de qualidade de vida da sociedade, ao conseqüente aumento da procura de energia para o seu conforto térmico, este sector prospere sofrer um crescimento no consumo global de energia. Nesse sentido, um crescente interesse tem surgido no desenvolvimento de sistemas energeticamente eficientes baseados em fontes renováveis, com o intuito de contribuir na satisfação das exigências de arrefecimento e aquecimento, e, por sua vez, contribuir para uma maior sustentabilidade não só energética, mas também ambiental.

Para além da sua convencional exploração (i.e. produção de energia elétrica), a energia geotérmica tem vindo a apresentar outra visão explorativa e integrar-se no ramo das fontes renováveis que possibilitam serem utilizadas diretamente para a aquecimento e arrefecimento, como é o caso da solar e biomassa. O aproveitamento da energia térmica contida nas camadas mais superficiais do solo tem sido alvo de grande atracção nos últimos tempos, visto este recurso encontrar-se acessível a toda a gente e poder fornecer ambos os efeitos de aquecimento e arrefecimento.

Neste sentido, a utilização de permutadores de calor ar-solo tem-se demonstrado uma estratégia que pode desempenhar um papel importante na resposta das necessidades de climatização e na conservação de energia. Mediante os progressos realizados nos conhecimentos nesta matéria, estes sistemas têm vindo a melhorar alguns aspetos e adquirir melhores desempenhos, mostrando-se atualmente com uma estratégia regida pela sua simplicidade, baixo custo de operação e de manutenção, e, capaz de satisfazer ambas as finalidades de aquecimento e arrefecimento.

1.1. Perspetiva geral

A tendência do aumento do consumo de energia é uma realidade inquestionável, evidenciada pela recolha de dados efetuada em diferentes níveis, mundial, europeu e nacional, conforme se apresenta. Assim, segundo o U.S. Energy Information Administration (EIA), como referido no relatório International Energy Outlook (2016), é previsto, no período entre 2012 e 2040, um crescimento a nível mundial do consumo de energia primária em cerca de 48%, mais acentuado nos países não pertencentes à OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico), onde se admite um valor próximo de 71%, impulsionado pelo crescimento populacional e económico de longo termo previsto para algumas das economias emergentes desses países. Sobre a importância dos países não pertencentes à OCDE no consumo global de energia, a BP (British Petroleum) realça no seu último relatório anual Statistical Review of World Energy (2016) que no ano transato, em 2015, estes totalizaram cerca de 58% desse consumo, somando pelo oitavo ano consecutivo um consumo superior aos países membros da OCDE.

Ainda no relatório da BP, é possível verificar que os combustíveis fósseis continuam a fornecer a maior parte da energia ao mundo, cerca de 86%, permanecendo o petróleo como combustível dominante, respondendo em cerca de 33% do consumo global de energia primária em 2015. A recolha de dados revela a grande dependência da sociedade atual de recursos cujo esgotamento se prevê a médio prazo. Tendo em vista a tendência do crescimento da população mundial e da industrialização dos países em desenvolvimento, estes cenários revelam-se preocupantes, nomeadamente nos problemas relacionados pelas emissões de gases poluentes causadores do efeito de estufa (Gases de Efeito de Estufa - GEE).

À vista disso, a International Energy Agency (IEA) propõem no relatório publicado pela Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2014 Synthesis Report (2015), cinco medidas políticas comprovadas para um desenvolvimento sustentável, relativamente ao sector energético. Essas medidas apontam para o aumento do investimento em energias renováveis, com intuito de minimizar a dependência de fontes de energia fósseis, na diminuição gradual dos subsídios referentes ao consumo de combustíveis fósseis e da utilização de centrais a carvão menos eficientes, proibindo a sua construção em tempos futuros. O desenvolvimento de tecnologias neste domínio revela-se outra aposta para o aumento da eficiência energética, nomeadamente no setor da indústria, edifícios e transportes, como forma de mitigar a procura de energia. Por fim, o IEA propõe também a redução das emissões de metano provenientes da produção de petróleo e gás natural.

Por outro lado, a União Europeia em consequência da sua dependência energética relativamente a terceiros, que se mantém acima dos 50% desde de 2005 e que em 2014 foi de cerca de 53,4%, de acordo com o relatório da Eurostat (2016), veio a definir no seu relatório European Commission (2008) três metas para 2020, fundamentais para o crescimento competitivo, seguro e sustentável da Europa. Este pacote de medidas já se encontra

reformulado em perspetiva para 2030 no relatório European Commission (2014), sendo proposto a diminuição das emissões de gases com efeito de estufa em 40%, na melhoria, em 25%, da eficiência energética e no aumento da contribuição das fontes de energias renováveis no consumo de energia em 27%.

Relativamente a Portugal, a dependência energética face ao exterior assume valores ainda mais preocupantes, cerca de 78% em 2015, representando um aumento de aproximadamente 6% face ao ano transato, evidenciado no relatório da Direcção Geral de Energia e Geologia (2016). Em conformidade com os compromissos assumidos no contexto das políticas energéticas europeias, a aposta na eficiência energética revela-se também uma das estratégias consideradas para aumentar a independência de Portugal face aos combustíveis fósseis, como vem referido no documento Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento (2010).

Destaca-se que o setor dos edifícios (residenciais e de serviços) é responsável por uma parte significativa do consumo global de energia. De acordo com a EIA (2016) os edifícios, em 2012, foram responsáveis pelo consumo de aproximadamente 20% de energia fornecida a nível mundial, sendo previsto que o consumo no setor habitacional cresça em média cerca de 1,4% ao ano e que no setor de prestação de serviços o valor seja de cerca de 1,6%, no período entre 2012 e 2040. Por consequência, o crescimento do consumo dos edifícios tem vindo a provocar, desde há algumas décadas atrás, um aumento significativo das emissões de gases poluentes causadores do efeito de estufa. Segundo o IPCC (2014) as emissões de gases de efeito de estufa referente a este setor duplicou entre 1970 e 2010, evidenciando-se neste último ano um total de 9,2 GtCO₂eq (Giga toneladas equivalentes de CO₂).

A nível europeu, o sector dos edifícios consome mais energia que qualquer outro sector da economia, representando em 2014 cerca de 38% da energia total consumida pelos 28 países membros, de acordo com o relatório European Commission (2016). Da análise da informação contida nesse relatório resulta ainda que, entre 2000 e 2014 a procura de energia final para os edifícios cresceu de aproximadamente 1,7%. Numa perspetiva a longo prazo, o relatório European Commission (2016b) prevê que em 2050 essa procura seja superior a aproximadamente 0,4% para o setor habitacional e 0,35% para o setor terciário, face os dados de 2015.

Embora menos significativo, mas também ele expressivo, o consumo de energia no sector dos edifícios em Portugal contabilizou, em 2014, cerca de 30% no consumo final e 63% no consumo de energia elétrica, de acordo com os dados revelados no relatório Direcção Geral de Energia e Geologia (2015).

Neste setor o consumo de energia encontra-se associado a diversos fins, para aquecimento e arrefecimento ambiente, produção de água quente sanitária, preparação de alimentos, uso de aparelhos elétricos diversos, iluminação, etc. No conjunto destas aplicações a climatização revela-se como responsável pela maior parte do consumo energético. Em 2010, cerca de 37%

do consumo de energia final, a nível mundial, teve como finalidade responder às necessidades de arrefecimento e aquecimento ambiente dos edifícios (IPCC, 2014). Por sua vez, dos 28 países membros da EU, ODYSSEE (2015) revela que, em 2012, cerca de 67,5% do consumo de energia associado aos edifícios destinou-se a satisfazer as condições de conforto térmico dos ocupantes.

Em virtude da relevância que este sector representa no consumo de energia final da União Europeia, os edifícios evidenciam-se desta forma como um setor com grande potencial de poupança, constituindo-se, assim, setor chave no alcance dos objetivos traçados. A European Commission (2016c) refere que os valores associados às necessidades de aquecimento e arrefecimento de edifícios deverão ser influenciados pelos requisitos impostos de desempenho energético fixados pela legislação. Neste sentido, destaca-se a diretiva que enquadra o desempenho energético de edifícios (EPBD; 2010/31/UE), à qual encontra-se filiada a diretiva de eficiência energética (EED; 2012/27/EU), e a diretiva associada à integração das energias renováveis neste setor (RED; 2009/28/EC). O conjunto dos requisitos presente nestas diretivas têm como finalidade estabelecer condições para melhorar o desempenho energético de edifícios da UE.

Realça-se assim que, em 2020, todos os novos edifícios deverão apresentar um balanço energético próximo de zero (NZEB), sendo que o consumo de energia deve ser coberto predominantemente por fontes renováveis, produzida no local ou nas proximidades. Ainda assim, a EPBD prevê a integração, nos novos edifícios, de sistemas energeticamente eficientes baseados em energias alternativas para responder às necessidades de climatização, como referido no relatório da European Commission (2016c).

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

O arrefecimento e aquecimento ambiente de edifícios constituem necessidades energéticas indispensáveis para garantir o conforto térmico adequado aos ocupantes.

Num cenário mundial, o IPCC (2014) revela um panorama preocupante no consumo de energia direcionado nessa vertente. Esta entidade prevê que, entre 2010 e 2050, os setores habitacional e de serviços sofram um crescimento substancial do consumo de energia para aquecimento e arrefecimento em cerca de 79% e 84%, respetivamente. O IPCC revela que este cenário será impulsionado pelo aumento da população e pelo desenvolvimento económico dos países emergentes, vindo, assim, intensificar o crescimento da construção de infraestruturas e aumentar, por sua vez, as áreas requeridas a climatizar.

Em 2010, foram contabilizados cerca de 28 biliões de m², em termos de piso, pertencentes ao conjunto dos edifícios residenciais e de prestação de serviços, a nível europeu, dos quais 71% são referentes ao setor habitacional. É previsto em 2050 um aumento substancial deste valor, nomeadamente em cerca de 8 biliões de m² (IEA, 2013). Para além da possível tendência de crescimento do espaço ter impacto sobre a procura de energia na climatização de edifícios,

segundo a European Commission (2016c), é previsto que, em virtude das alterações climáticas (aquecimento global), ocorra um aumento da procura de arrefecimento sob as tendências atuais, e que a procura de energia para aquecimento seja reduzida, embora esta deva manter-se como a maior parcela do consumo de energia neste setor.

De acordo com a informação disponibilizada no relatório da European Commission (2013), projeta-se para o setor habitacional que no período entre 2010 e 2050 ocorra uma redução de 11% na procura de energia direcionada para o aquecimento ambiente. Porém, é previsto um crescimento de 3% referente às necessidades arrefecimento. O panorama associado para o setor terciário apresentar-se-á semelhante, embora com uma maior variação, sendo assim previsto entre 2010 e 2050 um crescimento de 5% referente à procura de energia para arrefecimento e uma queda de 13% associada ao aquecimento ambiente. Destaca-se ainda que em 2050 as necessidades de climatização no setor residencial e terciário serão responsáveis por cerca de 58% e 41% da procura de energia final, respetivamente. Estes últimos dados mostram que a procura de energia direcionada para a climatização de espaços continuará a ter um grande peso no consumo de energia na UE.

Relativamente ao cenário do aumento da procura de energia para arrefecimento, surge a questão do crescimento do mercado dos sistemas baseados no princípio da refrigeração por compressão de vapor (ar condicionado), uma vez que, na generalidade, estes revelam-se os mais empregues nesse domínio. Segundo a European Commission (2016d) as vendas de aparelhos de ar condicionado para as habitações da UE foram estimadas em cerca de 3 milhões de unidades por ano em 2010, sendo previsto em 2030 ampliar-se para 4,5 milhões. À vista disso, torna-se previsível que o aumento da utilização destes sistemas terá uma influência cada vez mais relevante no consumo de energia da EU, gerando algumas preocupações, nomeadamente nas companhias responsáveis pela produção de electricidade, em consequência do aparecimento de picos de procura dessa forma de energia (Hollmuller, 2005).

É de referir ainda que a utilização massiva destes equipamentos levanta questões sobre o seu impacto no meio ambiente. Para além das emissões indiretas de gases poluentes, resultantes da queima de combustíveis fósseis para gerar a energia elétrica para estes equipamentos, surge também o problema de alguns fluidos refrigerantes ainda conterem compostos de cloro e/ou fluor (i.e., CFC's, HCFC's, HFC's), cuja libertação acidental para a atmosfera conduz ao efeito do aquecimento global (efeito de estufa) e da destruição da camada de ozono (Manjul & Bartaria, 2016 e U.S. Department of Energy, 2016).

Perante este facto, torna-se evidente a necessidade de desenvolvimento de soluções energeticamente eficientes e amigos do ambiente, que possam reduzir o consumo de energia e atenuar a utilização de sistemas convencionais para a obtenção do conforto térmico em edifícios. Neste sentido tem-se verificado nos últimos anos uma clara incidência de estudos

relacionados com sistemas de baixo consumo energético, para ajudar a responder às necessidades de climatização de edifícios e promover a sua sustentabilidade energética.

Uma estratégia de climatização que tem sido alvo de forte atenção nos últimos anos, nomeadamente por parte de diversos investigadores, é denominada por permutadores de calor ar-solo ou, segundo a terminologia inglesa, de Earth to Air Heat Exchanger (EAHE). Estes sistemas baseiam-se no uso do solo (i.e., subsolo) como fonte ou sumidouro natural de calor, sendo feito nele passar ar exterior por intermédio de tubos enterrados, de forma a tirar partido do ambiente térmico estável e das temperaturas que aí se verificam. Dada a sua elevada inércia térmica, o solo, mesmo nas suas camadas mais superficiais, contém uma quantidade considerável de energia térmica, sendo o Sol responsável pela sua renovação. Nessas camadas o solo possui a particularidade de apresentar temperaturas que são aproximadamente constantes ao longo do ano, verificando-se temperaturas superiores às verificadas do ar exterior nas estações frias e inferiores às contatadas nas estações quentes.

Mediante a utilização de permutadores de calor ar-solo é possível, por conseguinte, que o ar exterior seja arrefecido ou aquecido nos períodos do ano onde as respetivas necessidades de arrefecimento e aquecimento são requeridas. Este facto confere a estes sistemas uma capacidade que os diferencia de entre muitas estratégias passivas de climatização existentes. A sua simplicidade e baixo custo de funcionamento são outras particularidades que destacam esta estratégia, sendo que a sua combinação com uma arquitetura adequada do edifício às condições climáticas que este está inserido, permite atenuar, ou mesmo eliminar, a necessidade de utilização de sistemas convencionais ativos para o seu arrefecimento (Benhammou & Draoui, 2015). No entanto, a aplicação destes sistemas em zonas urbanas pode apresentar algumas restrições em virtude do espaço requerido para a sua implementação.

É no sentido de dar um contributo nesse domínio que constitui a motivação do presente trabalho, em que foi desenvolvido, construído, implementado e estudado um permutador de calor ar-solo compacto e de *design* inovador. Pretende-se com este estudo analisar a viabilidade de aplicação do permutador como estratégia de arrefecimento. O contributo deste trabalho não se encerrou com permutador de calor, tendo sido adicionalmente desenvolvido umas sondas para a monitorização da temperatura do solo em três localizações. Apesar do permutador ter sido testado apenas na estação de arrefecimento (verão), a monitorização do solo iniciou-se na estação de aquecimento (inverno), revelando temperaturas do solo adequadas para o aquecimento do ar interior de edifícios.

1.3. Revisão bibliográfica

Na secção que agora se segue é apresentada a revisão bibliográfica elaborada no âmbito da presente dissertação, enquadrando a sua temática no contexto das investigações realizadas até à data.

A revisão bibliográfica encontra-se dividida em subsecções, iniciando-se com a apresentação de trabalhos direcionados com o aproveitamento do solo por contacto indireto, mediante a utilização de permutadores de calor ar-solo, sendo também apresentadas aplicações desta estratégia. Adicionalmente, são evidenciados trabalhos que combinam a utilização de permutadores com outras soluções passivas/ativas (sistemas híbridos). Por fim, são apresentados trabalhos relacionados com a exploração do solo por contacto direto.

1.3.1. Trabalhos relacionados com o arrefecimento e aquecimento pelo solo por contacto indireto

Nesta subsecção serão revistos diversos trabalhos realizados na vertente dos permutadores de calor ar-solo, ou seja, através de exploração do solo por contacto indireto. Nesse sentido, verifica-se uma vasta investigação, tanto de natureza experimental, teórica e de modelação computacional, vocacionados, em particular, na análise do desempenho térmico e energético da solução adotada, mediante os parâmetros de dimensionamento (projeto) empregues e outros fatores externos que desempenham influência no seu desempenho e na sua viabilidade económica.

Givoni (2007) evidenciou, mediante estudos experimentais realizados por diversos autores, estratégias para reduzir a temperatura do solo, em período de arrefecimento, e, consequentemente, viabilizar a implementação de permutadores de calor ar-solo em climas quentes e áridos. Um dos estudos experimentais apresentado pelo autor, propõem o revestimento do solo com uma camada de seixos, com o objetivo de obstruir a incidência da radiação solar na camada superficial do solo e, a utilização de um sistema de irrigação para manter essa mesma camada húmida. Face a um solo sem qualquer tratamento, nas condições climáticas de Bersebá (Israel) durante o mês de agosto, a solução apresentada permitiu diminuir a temperatura do solo a 1 m, 2 m e 3 m de profundidade em cerca de 2 a 3 °C, respetivamente. O autor deste trabalho evidenciou que a utilização desta estratégia pouca influência apresenta sobre as baixas temperaturas exteriores exibidas em período de Inverno, justificado pelo balanço radiativo negativo.

Ainda neste contexto, Mogharreb et al. (2014) verificaram experimentalmente o efeito da cobertura do solo com vegetação (relva) no desempenho de um permutador de calor ar-solo acoplado de uma estufa em Meched (Irão). O permutador, construído em aço galvanizado, encontrava-se instalado horizontalmente, a 4 m de profundidade, abarcando 18 m de comprimento de tubagem e um diâmetro de 0,1 m. Os resultados obtidos perante uma área de 27 m² mostram que o revestimento do solo proporcionou, em período de Verão, um aumento da taxa de transferência de calor do permutador de calor em cerca 277 W, que por sua vez ocasionou um acréscimo do seu COP em 0,67.

Khabbaz et al. (2016) e Bojic et al. (1997) estudaram a influência do número de tubos, enterrados horizontalmente e paralelamente entre si, no desempenho de permutadores de

calor ar-solo em circuito aberto. Khabbaz et al. (2016) analisaram o efeito do uso de um e três tubos em PVC, de igual comprimento e diâmetro, albergados a uma profundidade média de 2,85 m. Este estudo contemplou o desenvolvimento de um modelo, o qual foi sujeito a simulações em TRNSYS e, consequentemente, validado por dados experimentais. Os resultados obtidos para o funcionamento contínuo do sistema e para o mesmo caudal de ar à entrada de cada tubo, ou seja 312 m³/h para o primeiro caso e 936 m³/h para o segundo caso, mostram que o uso de apenas um tubo permite proporcionar um maior decaimento/acrécimo da temperatura exterior, nos referentes períodos sazonais, comparativamente com três tubos, e, consequentemente, uma maior capacidade de arrefecimento/aquecimento. Os autores justificam este facto pela interação térmica entre cada tubo, devido ao reduzido espaçamento considerado entre cada um, minimizando, portanto, as trocas térmicas de cada tubo com o solo envolvente.

Noutra perspetiva, Bojic et al. (1997) verificaram, através de um modelo matemático por eles desenvolvido, que o aumento do número de tubos, com características geométricas iguais, permite garantir que a temperatura do ar que circula pelo permutador de calor se aproxima mais da temperatura do solo circundante, sendo este efeito mais notável para tubos de maior comprimento. Porém, estas conclusões não tomam em conta as influências da interação térmica entre cada tubo.

Mathur et al. (2015) investigaram a saturação térmica e a recuperação de um solo, de condutibilidade térmica de 0,52 W/mK, perante o funcionamento de um permutador de calor ar-solo em circuito aberto, implementado horizontalmente a 3 m de profundidade, em modo contínuo (24 h/24 h) e intermitente (8 h/dia). Neste trabalho é proposto um modelo de simulação numérica, sendo que os resultados obtidos foram validados experimentalmente sob condições climática de Jaipur (Índia). Para um diâmetro de tubo de 0,10 m e uma velocidade do ar à entrada de 6 m/s, o permutador após 90 dias de funcionamento contínuo mostra que ao fim de 5 m de tubo a temperatura do solo a uma distância de 0,1 m, segundo a direção radial da superfície do tubo, aumentou somente 3,25 °C. Os autores ditam que, em ambos os tipos de funcionamento, é possível diminuir a saturação térmica existente circundante à tubagem, nomeadamente através do aproveitamento das temperaturas exteriores mais baixas em período noturno. Tendo-se verificado que em modo contínuo a recuperação da temperatura do solo indicia-se mais perceptível devido ao regime de ventilação forçada, proporcionando uma transferência de calor mais eficaz comparativamente ao uso de nenhum mecanismo de transporte de fluido. Os autores referem ainda que o fenómeno de saturação térmica é agravado perante o aumento da temperatura do ar exterior e para solos de baixa condutibilidade térmica.

Bansal et al. (2013) confirmaram as declarações realçadas por Mathur et al. (2015), investigando o efeito de três solos com condutibilidades térmicas distintas (0,52 W/mK, 2 W/mK e 4 W/mK) no desempenho, em termos de arrefecimento, de um permutador de calor ar-solo.

Esta análise foi conduzida através de modelo em CFD (FLUENT), o qual foi validado por dados experimentais. O permutador posto em estudo é feito em PVC e encontra-se acomodado horizontalmente a 3,7 m de profundidade em circuito aberto, acarretando 100 m de comprimento e um diâmetro de 0,2 m. Os resultados obtidos constataam que, para uma velocidade do ar à entrada de 5 m/s e um período de funcionamento de 12h, o melhor desempenho térmico do permutador foi conseguido para o solo de maior condutibilidade térmica, 4 W/mK, apresentando uma queda da temperatura do ar de 2,7 °C superior à registrada no solo de condutibilidade térmica 0,52 W/mK. Em consequência, uma maior taxa de transferência foi alcançada pelo permutador implementado no solo de maior condutibilidade térmica, nomeadamente 2922 W comparativamente aos 2436 W conseguidos pelo solo de condutibilidade térmica 0,52 W/mK.

Ainda neste âmbito, Gao et al. (2016) verificaram, através de um modelo matemático por eles desenvolvido, o efeito da variação do conteúdo de água do solo no desempenho de um permutador de calor. Perante um permutador de calor enterrado a 2,0 m de profundidade num solo arenoso, durante 30 dias de simulação em período de arrefecimento, os autores observaram que o teor de água do solo tende a diminuir segundo a direção radial da superfície da tubagem. Para as mesmas condições, os autores ditam que este fenómeno se denunciou mais intensificado perante um conteúdo de água mais reduzido, refletindo-se numa diminuição da condutibilidade térmica do solo e da taxa de transferência de calor entre o permutador de calor e o solo envolvente. Em suma, os autores observaram um aumento da condutibilidade térmica do solo em cerca de duas vezes perante o aumento do teor de água do solo de 0,1 para 0,3 $m^3_{\text{água}}/m^3_{\text{solo}}$, e, verificaram que para uma temperatura de 35 °C, relativa ao fluido no interior da tubagem, o teor de água, circundante ao sistema, manteve-se constante ao longo da simulação para valores iguais e superiores a 0,2 $m^3_{\text{água}}/m^3_{\text{solo}}$.

Bezyan et al. (2015) compararam, por modelagem computacional, o desempenho de três permutadores de calor água-solo, em circuito fechado, instalados verticalmente com formatos distintos (U, W e helicoidal). As simulações realizadas mostram que, para as mesmas especificações de projeto, a configuração helicoidal foi a que obteve uma maior taxa de transferência de calor com o solo envolvente.

Por outro lado, Lee et al. (2015) confrontaram a influência da orientação (horizontal ou vertical) de permutadores de calor helicoidais, em circuito fechado, no seu desempenho. Os resultados alcançados foram obtidos experimentalmente e por um modelo de simulação, sob as condições climáticas de Incheon (Coreia do Sul). Ambos os permutadores de calor abarcam as mesmas especificações, porém, encontram-se instalados a profundidades distintas, nomeadamente 1,5 m (sistema horizontal) e 15 m (sistema vertical). Os autores verificaram que, a configuração horizontal proporcionou um pior desempenho térmico, justificado pela implementação do permutador a uma profundidade mais propícia às perturbações exteriores. Por conseguinte, o *COP* para o permutador orientado horizontalmente indicou-se menor. Além

disso, os autores referem que o investimento inicial se indicia superior para permutadores instalados verticalmente, devido essencialmente aos custos associados ao processo de escavação.

Ahmed et al. (2015) também estudaram o efeito da acomodação na vertical e horizontal de permutadores de calor ar-solo no desempenho térmico e energético conseguidos por estes, para arrefecimento. Esta investigação contemplou um estudo experimental e de simulação computacional (FLUENT) sob as condições meteorológicas de Rockhampton (Austrália). Ambos os permutadores evidenciaram uma configuração semelhante de circuito aberto, sendo que cada um deles se encontra acoplado a um espaço de investigação de 27 m³. Os permutadores de calor, horizontal e vertical, encontram-se implementados a uma profundidade de 0,6 m e 1,21 m, respetivamente. Os resultados de simulação comprovaram mais uma vez que o sistema vertical proporcionou um melhor desempenho térmico. Permitiu, em termos médios, uma redução da temperatura do espaço interior em cerca de 2 °C comparativamente à redução de apenas 1 °C conseguida pelo permutador horizontal. A análise energética permitiu concluir que a configuração vertical permitiu uma poupança energética de 866,54 kW/ano face a 579,91 kW/ano conseguidos pelo permutador orientado horizontalmente.

Ahmed et al. (2016) efetuaram um estudo paramétrico, por modelagem computacional (FLUENT), com o objetivo de avaliar o desempenho térmico de um permutador de calor ar-solo em circuito aberto, distribuído horizontalmente, mediante o efeito da variação do material, comprimento e diâmetro da tubagem, profundidade de enterro do permutador e velocidade do ar à saída do permutador. Os autores verificaram que o material da tubagem induz uma irrelevante influência no desempenho de permutadores de calor ar-solo, porém, observaram que o aumento da velocidade do escoamento de ar, do diâmetro e do comprimento do tubo, assim como, a proximidade do permutador à superfície do solo, causam por sua vez a redução do desempenho. Conclusões semelhantes foram obtidas nos estudos de Ghosal & Tiwari (2006) e Misra et al. (2014).

Wu et al. (2007) analisaram a potência de arrefecimento de permutadores de calor ar-solo mediante o efeito da variação da velocidade do ar que é admitido no permutador, e do diâmetro da tubagem. O estudo contemplou o desenvolvimento de modelo numérico, o qual foi simulado em CFD. Os resultados obtidos mostram que o aumento desses parâmetros permite proporcionar um incrementado da potência de arrefecimento dos permutadores, uma vez que este não depende apenas da diferença de temperatura entre a entrada e a saída do permutador, mas também do caudal mássico de ar.

Chel & Tiwari (2009) desenvolveram um modelo de um permutador de calor ar-solo, de circuito fechado, integrado a um edifício residencial com o intuito de prever os benefícios térmicos e energéticos consentidos por esta estratégia. As simulações do modelo desenvolvido foram validadas por dados obtidos experimentalmente sob condições meteorológicas de New Delhi

(Índia) para um permutador de calor enterrado horizontalmente, em forma de serpentina, a 1,5 m de profundidade, contemplando 78 m de comprimento de tubagem com 0,06 m de diâmetro. Os resultados experimentais mostraram que o permutador de calor permitiu que a temperatura no interior do edifício permaneça numa gama de valores entre 5 a 15 °C, acima ou abaixo, relativamente à temperatura exterior, num horizonte anual. No prisma energético, o sistema permitiu uma poupança de energia equivalente a 10 321 kWh/ano que, conseqüentemente, resultou numa mitigação das emissões de dióxido de carbono equivalente a 16 toneladas/ano. Relativamente à eficiência energética sazonal do sistema, os resultados obtidos enquadram-se numa gama de valores entre 2 e 3. Quanto ao investimento do sistema, os autores relatam que o *payback* se enquadra num período inferior a dois anos.

Woodson et al. (2012) apresentaram um estudo experimental sob as condições meteorológicas de Uagadugu (Burkina Faso) relativo à monitorização da temperatura do solo em diferentes profundidades e do desempenho térmico de um permutador de calor, em circuito aberto, acoplado a um edifício de pesquisa com 51,4 m³ de volume. O permutador de calor, feito em PVC, apresenta-se instalado horizontalmente a 1,5 m de profundidade, o qual envolve 25 m de tubo com um diâmetro externo de 0,125 m. Os resultados experimentais mostram que, para um caudal de ar de 95 m³/h, o permutador de calor proposto possibilitou em período de Verão diminuir a temperatura do ar exterior em cerca de 7,6 °C. Quanto às medições da temperatura do solo a profundidades de 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m, os autores observaram uma clara atenuação das oscilações da temperatura exterior mediante o avanço em profundidade, tendo-se verificado perante temperaturas exteriores rondando os 43 °C, que a temperatura do solo a 1,5 m uma profundidade persistiu em média a 30,4 °C.

Ozgener & Ozgener (2010) apresentaram pela primeira vez uma análise exérgica do desempenho de um permutador de calor ar-solo, em circuito fechado, estando este acoplado a uma estufa sob as condições climáticas de Esmirna (Turquia). O permutador de calor posto em estudo é constituído em aço galvanizado, encontrando-se implementado horizontalmente a 3 m de profundidade, em forma de U, envolvendo um comprimento e um diâmetro nominal de 47 m e 0,56 m, respetivamente. Relativamente ao sistema de ventilação associado ao circuito, este detém uma potência elétrica nominal de 736 W. Posto isso, os resultados da análise exérgica permitiram concluir que o permutador de calor e a unidade de ventilação são os principais componentes responsáveis pela perda de exergia, perfazendo um total de 2,76 kW. Evidenciaram que o permutador de calor se revela o que abarca maior grau de irreversibilidade, cerca de 2,50 kW. Quanto ao *COP* e à eficiência exérgica global do sistema resultou em média em 5,89 e 56,9%, respetivamente. Com base neste estudo os autores pretenderam criar uma nova ferramenta que contribua para a otimização do desempenho global desta estratégia, minimizando as perdas exérgicas através do melhoramento do *design* do permutador e da seleção de equipamentos mais eficientes.

Lee & Strand (2008) estudaram o fator clima na capacidade de aquecimento e arrefecimento de um permutador de calor ar-solo, em circuito aberto, acoplado a um edifício com uma área útil de 354 m². Os autores recorreram a simulações no programa EnergyPlus através de um modelo por eles desenvolvido. Este estudo baseou-se em quatro climas distintos (ameno e seco, ameno e húmido, quente e seco, quente e húmido) referentes a quatro cidades dos Estados Unidos da América (EUA), considerando uma velocidade do escoamento de ar constante (1,5 m/s) ao longo de um permutador enterrado a 2,13 m de profundidade, envolvendo um diâmetro de 0,3 m e um comprimento total de 24,7 m. O modelo desenvolvido pelos autores foi validado por estudos de natureza experimental e teórico realizado por outros investigadores. Os resultados obtidos para o período de arrefecimento mostram que as regiões de clima ameno e húmido, e, ameno e seco, foram as únicas que revelaram uma diminuição das necessidades de arrefecimento perante a aplicação do permutador, 6,6 kWh e 8,8 kWh, sucedendo uma poupança energética de 31 e 52%, respetivamente. Relativamente ao insucesso obtido nos restantes climas, os autores justificam este fato pelas temperaturas do ar exteriores mais elevadas que, por conseguinte, causaram um aumento da temperatura do solo. Porém, para o período de aquecimento, a aplicação do permutador não conseguiu fornecer em qualquer clima uma temperatura mais alta daquela aduzida na zona de conforto do edifício. Em suma, os autores relatam que para viabilizar a implementação desta estratégia, devem ser considerados tanto as condições climáticas bem como o tipo de solo.

1.3.2. Trabalhos relacionados com a aplicação de permutadores de calor ar-solo

O aproveitamento da energia geotérmica por contato indireto encontra-se associado a inúmeros domínios, nomeadamente na climatização de edifícios, equipamentos eletrónicos, estufas agrícolas, entre outras aplicações em que esta fonte de energia, alternativa e limpa, atua de forma a proporcionar condições térmicas favoráveis mediante o propósito em causa.

Barakat et al. (2016) desenvolveram um modelo matemático com o objetivo de prever a potência de saída e a eficiência térmica de uma turbina a gás, estando esta associada a um permutador de calor ar-solo em circuito aberto. Este trabalho propõe o estudo do aproveitamento do solo como fonte de arrefecimento para diminuir a temperatura do ar que é admitido para o compressor de uma turbina a gás de 125 MW, tomando como valores típicos de temperatura do ar exterior e propriedades do solo de New Gas Damietta (Egipto). Numa primeira fase os autores efetuaram uma análise paramétrica para analisar o desempenho térmico de um permutador de calor ar-solo, com base na variação das dimensões da tubagem e da velocidade do ar à entrada da mesma. Um modelo em PVC, com 853 tubos distribuídos horizontalmente e paralelamente entre si a uma profundidade de 5 m, com um diâmetro de 0,35 m e um comprimento de 85 m, foi tomado como modelo. Os resultados obtidos mostram que a sua aplicação permitiu reduzir a temperatura do ar de admissão da turbina, de 40 °C para 29,14 °C após um período funcionamento contínuo de 12 h, aplicando uma velocidade do ar de

4,5 m/s à entrada do permutador. Em consequência disso, a potência de saída da turbina aumentou cerca de 9%, que por sua vez permitiu um aumento da sua eficiência térmica de 4,8% e um decréscimo do consumo específico de combustível de 4,4% comparativamente com a situação sem sistema de arrefecimento à entrada da turbina a gás. Por fim, foi efetuada uma análise económica, mediante os dados da central termoelétrica de New Gas Damietta, para analisar os lucros obtidos pelos benefícios conseguidos pela utilização do permutador de calor, e o período de retorno sobre investimento efetuado. Os resultados mostraram um aumento da produção de energia elétrica de 12991 MWh/ano, uma redução do consumo de combustível de 1570 toneladas/ano, e um *payback* num prazo de 1,2 anos.

Dokkar et al. (2010) estudaram por modelagem numérica, a viabilidade da integração de uma chaminé solar com um permutador de calor ar-solo, com o intuito de remover o calor gerado pelos dispositivos eletrónicos resguardados num armário de telecomunicação de uma estação BTS (*Base Transceiver Station*) em Ouargla, Argélia. Os efeitos produzidos por esta aplicação demonstraram-se bastante satisfatórios, verificando-se, para uma velocidade do ar à entrada de 0,1 m/s e um diâmetro de entrada de ar de 0,4 m, que a temperatura do ar no centro do armário não excedeu os 29 °C, tendo-se empregue nas condições de fronteira do armário uma temperatura de 83 °C. Perante estes resultados, os autores verificaram claramente a inutilidade de sistemas AVAC, sendo que esta combinação nesta área de aplicação apresentou-se viável, revelando-se como uma solução passiva, de baixo custo e, sobretudo, benéfica para zonas remotas sem acesso a energia elétrica.

Yuping et al. (2008) desenvolveram um sistema de arrefecimento ar-solo, em forma de “T”, acoplado na parte inferior de um armário de telecomunicação típico FTTC. Este sistema baseia-se em dois ventiladores que direcionam o fluxo de ar quente, produzidos pelos diversos dispositivos eletrónicos, para o solo onde o calor será dissipado através de um conjunto de seis tubos constituídos em liga de alumínio e amónio, distribuídos paralelamente e horizontalmente, em formato característico de alhetas. Posto isso, o ar arrefecido é de novo reintroduzido para o interior do armário. Os resultados obtidos experimentalmente e por modelagem (CFD software: Flotherm 7.2) demonstraram que, para este armário com 700 W de carga térmica, esta solução possibilitou a dissipação de mais de metade dessa mesma carga, envolvendo a redução da temperatura do ar interior do armário em aproximadamente 5°C. O *COP* do sistema foi avaliado em cerca de 110.

Sharan et al. (2002) propuseram a implementação de um permutador de calor ar-solo na jaula de um tigre pertencente ao *Kamla Nehru Zoological Garden* (Ahmedabad - Índia). A introdução do sistema teve como objetivo atenuar as elevadas amplitudes térmicas sentidas ao longo do ano nessa região e contribuir para a preservação da espécie. Os autores desenvolveram um permutador de calor ar-solo constituído por dois tubos em aço com 0,20 m de diâmetro nominal, os quais se encontram distribuídos paralelamente na horizontal e distanciados entre si por 1,5 m, perfazendo um total de 40 m de circuito de permuta de calor enterrados a uma profundidade

de 1 m. Os resultados alcançados validaram a empregabilidade do permutador de calor ar-solo, na medida que permitiu diminuir ou aumentar a temperatura da jaula, de área útil 12 m x 4 m x 4 m, em cerca de 10 °C, tanto em período de Verão como de Inverno, mesmo estando esta completamente aberta.

Posteriormente, Sharan et al. (2004) estudaram experimentalmente a integração de um permutador de calor ar-solo de circuito fechado a uma estufa com um volume de 360 m², utilizada para o cultivo de tomate, localizado em Gujarat (Índia). O permutador de calor apresenta duas fileiras, enterradas a profundidades diferentes, 2 m e 3 m, constituídas cada uma delas por quatro tubos em aço espaçados entre si de 1,5 m apresentando cada um 23 m de comprimento e um diâmetro nominal de 0,20 m. Foi empregue uma unidade de ventilação capaz de promover 20 renovações de ar por hora, equivalente a 7200 m³/h. Os resultados obtidos foram considerados promissores, possibilitando em 30 minutos aumentar a temperatura no interior da estufa de 15 °C para 22 °C, em noites típicas de Inverno. Em modo de arrefecimento, o permutador permitiu diminuir a temperatura o ar em cerca de 7 °C. Por último, os autores evidenciaram um aumento de 2,7 vezes no rendimento da produção de tomate e uma diminuição do consumo de água de 34%, comparativamente à sua produção em campo aberto nesta localização.

Santamouris & Kolokotsa (2013) apresentaram um artigo de revisão referente a 30 projetos experimentais, realizados até à data, empregando permutadores de calor ar-solo como sistema passivo de arrefecimento e aquecimento em diversos edifícios (administrativos, hospitalares, educativos, habitacionais, comerciais, entre outros) situados em climas quentes, frios e temperados. Mediante os dados e resultados relatados, os autores evidenciaram o benefício da utilização desta estratégia na mitigação do consumo energético no setor da climatização em muitas regiões. Porém, referem que o desempenho dos permutadores se encontra subordinado às condições climáticas e às características/propriedades do solo.

Um dos exemplos a nível Europeu referido por Santamouris & Kolokotsa (2013) foi o estudo realizado por Pfafferott (2003). Este autor estudou experimentalmente o desempenho térmico e energético de permutadores ar-solo, concebidos em polietileno, instalados em três edifícios de escritório situados em diferentes regiões da Alemanha. No primeiro caso, situado em Hamm, abrangendo uma área de ocupação de 6000 m², foram instalados 26 tubos a uma profundidade de 2 - 4 m, as quais apresentam comprimento e diâmetro a variar nos intervalos 0,2 - 0,3 m e 67 - 107 m, respetivamente. Para um caudal de ar médio de 10 300 m³/h, os resultados obtidos mostram que a temperatura do ar à saída do sistema, ao longo do ano, permaneceu numa gama de valores compreendidos entre 7 e 20 °C, perante temperaturas exteriores de -6 e 30 °C, nos alusivos períodos sazonais. Em termos energéticos, o sistema permitiu contribuir, em período de Inverno, com uma energia equivalente a 27 700 kWh/ano e 22 300 kWh/ano para o período de arrefecimento. Obtendo um COP global de 88. Relativamente ao segundo edifício, localizado em Freiburg, este apresenta uma área de superfície de 13 150 m², tendo sido implementadas,

a uma profundidade de 2 m, sete tubos com um comprimento de 95 m e um diâmetro de 0,25 m. Os resultados alcançados mostram, para um caudal de ar médio de 7000 m³/h, que o sistema proporcionou nos períodos mais críticos de Inverno e de Verão uma atenuação da temperatura exterior de 13 °C. Quanto ao desempenho energético, o sistema mostrou um potencial de conservação energético anual para aquecimento de 26 800 kWh e de 12 400 kWh para o período de arrefecimento. Tendo obtido um *COP* global de 29. Por último, no terceiro edifício, situado em Weilheim, com uma área de ocupação de 1000 m², foram implementados a 2,3 m de profundidade dois tubos de 90 m comprimento e de 0,35 m de diâmetro. Para um caudal de ar médio de 1100 m³/h, os resultados obtidos mostram que a temperatura do ar à saída do permutador, num horizonte anual, permaneceu numa gama de valores compreendidos entre 5 e 21 °C, na presença de temperaturas exteriores entre -12 e 34 °C. No que concerne à sua contribuição energética, o sistema permitiu poupar uma energia direcionada para aquecimento e arrefecimento de 3200 e 2400 kWh/ano, respetivamente, alcançando um *COP* global de 380.

1.3.3. Trabalhos relacionados com a combinação de permutadores de calor ar-solo com outros sistemas (sistemas híbridos)

Encontra-se também na literatura a utilização de permutadores de calor ar-solo acoplado a outras tecnologias (sistemas híbridos), sejam elas passivas ou ativas, e, que tenham a mesma ou diferente finalidade.

Segundo a extensa revisão literária realizada por Soni et al. (2016), a adoção de tal estratégia está a ganhar alguma preferência face à simples utilização de sistemas de permutador de calor, devido à maior eficiência conseguida, em geral, pelos sistemas híbridos e, particularmente, pelo interesse gerado na conservação de energia e na redução das emissões de gases poluentes promovidas pelas combinações empreendidas.

Neste sentido, Benhammou et al. (2015) apresentaram um estudo, realizado segundo as condições climáticas típicas do deserto Argelino (Adrar) em período de Verão, de um sistema híbrido destinado ao arrefecimento de edifícios. A solução passiva é composta por um permutador de calor ar-solo, feito em PVC e enterrado a 2 m de profundidade, acoplado a uma torre de vento. Os autores desenvolveram um modelo analítico transiente, o qual foi validado analiticamente e experimentalmente por dados obtidos por outros investigadores, com o objetivo de analisar o desempenho térmico do sistema híbrido mediante a variação dos parâmetros de projeto dos sistemas integrados. Dos resultados obtidos, os autores verificaram um claro aumento da capacidade de arrefecimento conjugando os dois sistemas, apresentando quedas substanciais na temperatura do ar exterior variando entre 12,5 - 20 °C, comparativamente a 7,5 - 8,5 °C alcançados pela simples utilização da torre de vento. Observaram ainda que a influência das dimensões do permutador se sobrepunha à influência da dimensão da torre de vento.

Misra et al. (2012) testaram experimentalmente, sob as condições climáticas de Ajmer (Índia) nos períodos mais quentes do Verão, uma solução constituída por um permutador de calor ar-solo e uma unidade de ar condicionado, com o intuito de minorar o consumo energético do sistema AVAC através da redução da temperatura da serpentina do condensador. A configuração experimental encontra-se acoplada a um espaço de 50 m³, envolvendo um permutador de circuito aberto. Este é constituído por uma tubagem em PVC, com um diâmetro interno de 0,10 m e um comprimento de 60 m, encontrando-se disposta horizontalmente a uma profundidade de 3,7 m. Os resultados obtidos mostraram que, face à simples utilização do sistema AVAC, o sistema híbrido proposto evidenciou-se mais eficaz na diminuição da temperatura do ar da sala, dada a redução garantida da temperatura do condensador, numa gama entre 4,5 e 7,7 °C, que, conseqüentemente, proporcionou uma redução no consumo de energia do sistema AVAC de cerca de 18,1%.

Jakhar et al. (2015) desenvolveram experimentalmente um sistema híbrido passivo para aquecimento, conjugando o mesmo permutador de calor ar-solo desenvolvido por Misra et al. (2012) com um sistema de aquecimento de ar solar integrado à sua saída. Este último consiste numa conduta, revestida por uma tinta escura, em ferro galvanizado, em formato de 'L', abarcando um comprimento total de 12,2 m e uma secção transversal de 0,0645 m². Os resultados obtidos mostram que esta combinação permitiu aumentar a potência de aquecimento do permutador de calor até 1280,8 kWh e, conseqüentemente, um aumento do seu COP até 4,57, para períodos de ensaio experimentais de 24 horas. Os autores relatam ainda que o sistema híbrido proporcionou, face à situação sem qualquer sistema de aquecimento, um aumento da temperatura do ar da sala entre 1,1 e 3,5 °C, sendo que mais de 82 - 85% desse aumento era obtido aos 34 m de comprimento do permutador. À vista disso concluíram que poderiam reduzir o comprimento do mesmo de modo a otimizar a relação custo/desempenho térmico do permutador de calor ar-solo.

Posteriormente, Bansal et al. (2012) analisaram, por modelagem CFD, o desempenho anual da mesma combinação efetuada por Bansal & Mathur (2009), porém, neste estudo, o sistema de arrefecimento evaporativo foi acoplado à saída do permutador de calor ar-solo. O permutador encontra-se instalado horizontalmente a uma profundidade de 2,7 m e é constituído em PVC, envolvendo uma tubagem com diâmetro interno de 0,15 m e comprimento de 23,42 m. Mediante as condições climáticas de Ajmer (Índia), os resultados obtidos demonstraram um acréscimo de 69% no efeito de arrefecimento do permutador através do seu acoplamento à unidade de arrefecimento evaporativo.

O sistema híbrido desenvolvido por Rodrigues & Gillott (2013) assume uma outra perspetiva para a climatização de edifícios, combinando o arrefecimento pelo solo com a acumulação de energia por calor latente, visando ultrapassar as diversas limitações de ambas as estratégias. O estudo experimental baseou-se na utilização de uma placa de gesso, aplicada a 12 cm do teto do espaço em estudo, contendo material de mudança de fase (parafina), com

fusão/solidificação à temperatura de 23 °C, e um permutador de calor ar-solo de circuito aberto feito em polipropileno, que se encontra acomodado horizontalmente a uma profundidade de 1,5 m, apresentando um comprimento total de 36 m e um diâmetro externo de 0,2 m. O intuito desta solução consistiu em fornecer ar fresco, por intermédio do permutador de calor, à superfície com material de mudança de fase de forma a melhorar e intensificar a sua capacidade de troca de calor. Os resultados experimentais demonstraram que os benefícios da utilização da solução híbrida permitiram diminuir até 47% a oscilação da temperatura do ar do espaço em estudo, face aos 33% alcançados pela simples utilização da superfície com material de mudança de fase. Os autores referem, ainda, que a aplicação desta combinação em edifícios pode estender-se noutros períodos do ano, nomeadamente para aquecimento, e ser empregue noutras regiões perante condições climáticas distintas.

Chel & Tiwari (2010) propõem uma solução que combina a utilização de um permutador de calor ar-solo com um sistema fotovoltaico (2,32 kW). Os autores visaram com esta coligação mitigar o consumo de energia elétrica proveniente da rede requerido para a unidade de ventilação, entre outros equipamentos associados à investigação. O permutador de calor, construído em PVC, encontra-se instalado em Nova Déli (Índia), distribuído horizontalmente a uma profundidade de 1,5 m, apresentando uma configuração de circuito fechado, aduzindo um comprimento total de 78 m e um diâmetro de 0,06 m. Segundo os autores, o contributo do sistema fotovoltaico foi relevante na poupança de energia elétrica requerida pela unidade de ventilação em cerca de 2,628 kWh/ano. Relativamente às emissões de dióxido de carbono, os autores estimaram uma redução equivalente a 448 toneladas/ano durante 30 anos de utilização do sistema híbrido. Quanto ao desempenho do permutador de calor, este permitiu poupar, para um espaço em estudo (189 m³), uma energia equivalente a 3327 kWh/ano para a estação de aquecimento e 2667 kW h/ano correspondente ao período de arrefecimento.

Ainda no contexto energético, Diaz et al. (2013) e Diaz et al. (2014) propõem duas estratégias de controlo, PID e lógica fuzzy, com a finalidade de reduzir o consumo de energia de uma unidade de ventilação associada ao sistema permutador de calor ar-solo. Os estudos desenvolvidos basearam-se numa estimativa do caudal mássico de ar necessário para manter as condições de temperatura do ar desejáveis no interior do edifício, evitando insuflar a quantidade máxima de fluxo de ar, conseguido pelo sistema de ventilação, após a temperatura de referência ser alcançada. Um modelo termodinâmico por eles desenvolvido foi simulado através da plataforma Labview, sendo que os resultados alcançados, em ambos os tipos de controlo, validaram a sua aplicação, proporcionando uma conservação de energia 87-88% superior ao conseguido pela utilização de controladores convencionais (ON-OFF).

1.3.4. Trabalhos relacionados com o arrefecimento pelo solo por contacto direto

Outra perspetiva do uso das potencialidades térmicas do solo para arrefecimento e aquecimento, não menos importante, porém menos estudado, é através do seu contacto direto com o solo.

Van Dronkelaar et al. (2013) e Al-Temeemi & Harris (2004) efetuaram uma extensa revisão literária relativa às diversas potencialidades e inconvenientes associados aos edifícios completamente e parcialmente enterrados no solo. Al-Temeemi & Harris (2004) desenvolveram um método, composto por sete passos, para avaliar a viabilidade aplicativa desta estratégia. De acordo com esta metodologia, os autores ambicionaram facultar uma melhor perceção e compreensão, e, sobretudo, uma diretriz viável para o projeto desta estratégia, revelando as suas potencialidades no domínio da conservação energética. Van Dronkelaar et al. (2013) apresentaram, numa vertente pedagógica, diversas soluções construtivas de forma de mitigar as consequências adversas, nomeadamente psicológicas e fisiológicas, associadas a utilização desta estratégia. Alguns exemplos reais são apontados, demonstrando as diversidades construtivas existente em todo o mundo e os benefícios alcançados na preservação energética, subsequentes da sua aplicação.

Posteriormente, Dronkelaar et al. (2014) analisaram as potencialidades associadas aos edifícios enterrados na atenuação das necessidades de aquecimento e arrefecimento através de um modelo de cálculo mensal descrito pela norma EN-ISO 13790. O estudo contemplou uma análise comparativa entre edifícios enterrados e situados acima do solo, mediante diferentes climas, profundidades, função e parâmetros construtivos dos edifícios. Diante os resultados obtidos, os autores viabilizaram a implementação de edifícios enterrados no domínio da conservação energética, sendo que em cerca de 11% dos casos analisados constatou-se uma necessidade energética inferior a 10 kWh/m²ano. Verificaram que o seu desempenho se encontra subordinado pelo clima e pelos aspetos construtivos do edifício, em particular pelo coeficiente de transmissão térmica da envolvente e os seus ganhos internos. Por outro lado, os autores averiguaram que a atenuação das necessidades energéticas direcionada para a climatização é mais destacada nas regiões de média latitude e climas polares, proporcionando poupanças em cerca de 66%. Para os restantes climas referem uma economia equivalente a 42%.

Staniec & Nowak (2011) estudaram, por modelagem computacional, a influência de cinco tipos de solo, com propriedades térmicas distintas, no consumo anual de energia para aquecimento e arrefecimento de dois tipos de edifícios. Dois tipos de edifícios são analisados, um deles encontra-se situado acima do solo (convencional) e o segundo caso encontra-se parcialmente coberto por 1 m de solo. Os resultados obtidos demonstraram que o tipo de solo detém uma forte influência sobre as necessidades de aquecimento e arrefecimento para o segundo caso, entre 11-80%, comparativamente a 3-11% indicados para o primeiro caso. Os autores justificam este facto pela maior área de contacto do edifício com o solo e pela influência das condições

exteriores sobre a temperatura do solo a profundidades reduzidas. Perante isso, verificaram que, quanto menor for a condutibilidade e a difusividade térmica do solo, menor será a procura de energia referente às necessidades anuais de aquecimento do edifício, porém, de forma inversa, maior será a procura de energia alusiva ao arrefecimento do mesmo. Posto isso, os autores referem que na análise dos solos a capacidade térmica também deve ser tomada em conta. Por último, verificaram ainda que os valores de procura de energia podem ainda ser atenuados com o aumento da espessura do isolamento térmico da envolvente do edifício.

Givoni (2007) estudou o desempenho térmico de um edifício enterrado situado em Negev (Israel), região caracterizada por um clima quente e árido. O edifício apresenta um vão envidraçado orientado a Sul, sendo que a restante envolvente se encontra coberta por uma camada de 40 cm de terra. Perante os resultados experimentais obtidos em período de Verão, o autor deparou-se que a camada de solo não facultou um arrefecimento convincente, visto que a temperatura do ar no interior edifício foi superior, em média, à temperatura do ar exterior. Os autores justificam este facto pela adoção de uma restrita camada de terra, pelas condições climáticas predominantes desta região, pelas propriedades térmicas do próprio solo e pelo uso de nenhuma estratégia que visasse o seu arrefecimento. Contudo, averiguou que a cobertura de terra conduziu a uma maior inércia térmica ao edifício, garantindo uma certa estabilidade térmica, mesmo mediante temperaturas elevadas no exterior. Outras condições foram estudadas, nomeadamente através do aproveitamento da ventilação natural, em período noturno, sendo que os resultados alcançados permitiram, neste caso, uma redução mais significativa da temperatura interna do edifício.

1.4. Objetivos e contribuição da presente dissertação

Do que foi apresentado nas subsecções anteriores resulta que:

Uma parte significativa do consumo de energia dos edifícios encontra-se direccionado para o seu aquecimento e arrefecimento. Perante as tendências futuras apresentadas pelas entidades responsáveis por esta análise, espera-se que a procura de energia para a climatização venha a crescer, impulsionada pelas alterações climáticas, pelo crescimento populacional, pelo desenvolvimento económico de alguns países, acompanhado pela melhoria dos padrões de qualidade de vida da população, e pela redução dos preços dos equipamentos empregues para esse fim.

Na Europa, prevê-se que a utilização de sistemas de ar condicionado venha a crescer nas próximas décadas como consequência do aumento das necessidades de arrefecimento dos edifícios, o que conduzirá, por sua vez, a um crescimento do consumo de energia e das emissões de gases poluentes associadas (diretas e indiretas).

Várias metas têm sido impostas para mitigar essa tendência, a título de exemplo, todos os novos edifícios dos países membros da União Europeia serão obrigados, até 2020, apresentarem um

balanço energético próximo de zero, sendo que o consumo de energia deverá ser coberto predominantemente por fontes renováveis.

O recurso a estratégias de aquecimento e arrefecimento de baixo consumo e que integram o aproveitamento de energias alternativas e limpas, pode contribuir de forma significativa no alcançar desse objetivo.

A utilização do solo como fonte de climatização tem merecido cada vez mais interesse por parte de diversos investigadores, nomeadamente perante o seu aproveitamento por contacto indireto (permutadores de calor), uma vez que esta estratégia tem a capacidade de fornecer ambos os efeitos de arrefecimento e aquecimento, e, envolver reduzidos custos de funcionamento.

Definem-se, assim, como os objetivos principais do presente trabalho:

Conceção e desenvolvimento de um permutador de calor ar-solo compacto e de *design* inovador, ou seja, ainda não apresentado no contexto de investigações e trabalhos anteriores.

Implementação do permutador nas instalações da Universidade da Beira Interior (Faculdade de Engenharia).

Realização de ensaios experimentais durante o período de Verão para analisar o desempenho do permutador de calor, em termos de arrefecimento, sendo ainda estudado o impacto da variação do caudal volumétrico sobre este.

Adicionalmente, o presente trabalho inclui ainda os seguintes objetivos:

Conceção e desenvolvimento de sondas que permitem a monitorização da temperatura do solo, metro a metro, até aos 5 metros de profundidade.

Implementação dessas sondas em três localizações diferentes em terrenos da Universidade da Beira Interior, nomeadamente uma junto à Faculdade de Engenharias e duas na Reitoria.

Realização de estudos experimentais que permitam o conhecimento do padrão das temperaturas dos respetivos solos, mediante a monitorização semanal e por períodos mais restritos, nomeadamente de 24 horas.

1.5. Visão geral da organização da dissertação

A presente dissertação é constituída por seis capítulos, cuja organização se descreve de seguida.

O capítulo 1 apresenta-se como de introdução ao tema do presente trabalho. Inicialmente é exposta uma visão geral da situação energética atual e previsões futuras, é dado especial ênfase

ao consumo direcionado para os edifícios e são apresentadas as diretivas europeias que regularizam e enquadram este setor. Posteriormente é apresentada uma revisão bibliográfica que permite o enquadramento do trabalho no contexto de estudos realizados anteriormente. É em seguida definido o problema em estudo, elucida-se a sua relevância prática e traçam-se os respetivos objetivos do presente trabalho. O capítulo é finalizado expondo de forma resumida a estrutura da presente dissertação.

Inicia-se o capítulo 2 com uma introdução ao solo enquanto fonte térmica, contextualizando em primeiro ponto a sua formação, composição e alguns fatores intervenientes no seu comportamento térmico. Segue-se pela exposição e a descrição dos mecanismos de transferência de calor que ocorrem neste meio. São apresentadas as propriedades térmicas dos solos e os fatores que influenciam o comportamento destas. Apresentam-se, ainda, os ciclos característicos do regime térmico do solo, sendo analisado os principais fatores associados a estes fenómenos e as estratégias que permitem modificá-los. Este capítulo é encerrado com a apresentação de quatro análises granulométricas realizadas no contexto do presente trabalho, sendo exposto o procedimento experimental efetuado para a realização das respetivas análises e discutido os resultados obtidos.

No capítulo 3 é abordada a utilização do solo como fonte de arrefecimento e/ou aquecimento. São apresentados numa primeira fase os diversos domínios explorativos da energia geotérmica, dando particular incidência à sua vertente de muito baixa entalpia, apresentando os seus possíveis modos de aproveitamento. Nesse sentido, o capítulo particulariza-se para a exploração da energia geotérmica mediante a utilização de permutadores de calor ar-solo, sendo apresentado o seu princípio de funcionamento e algumas das suas configurações mais recorrentes. São discutidos os parâmetros e fatores mais relevantes que influenciam o seu desempenho, sendo também descritos algumas das vantagens e desvantagens mais pertinentes da utilização destes sistemas. São ainda apresentadas as fórmulas matemáticas referentes ao cálculo da sua potência térmica e coeficiente de desempenho (*COP*). Por último, são apresentados alguns casos aplicativos de permutadores de calor ar-solo em Portugal.

O capítulo 4 compreende a apresentação dos equipamentos empregues no estudo experimental realizado no âmbito do presente trabalho. O capítulo inicia-se com a descrição do permutador de calor ar-solo proposto, sendo apresentados e justificados os parâmetros escolhidos para a sua conceção, seguido pela descrição da metodologia empregue para a sua construção, expondo todos os materiais utilizados, e por fim, aludindo às etapas adotadas para a sua implementação. Em seguida, são apresentadas as sondas desenvolvidas para a monitorização da temperatura do solo, sendo exposto, de igual forma, todos aspetos relativos à construção e implementação destas. O capítulo finaliza-se apresentando todos os equipamentos auxiliares utilizados durante os estudos experimentais.

No capítulo 5 é feita a apresentação dos estudos experimentais realizados referentes ao permutador de calor ar-solo e à monitorização da temperatura dos solos. São descritas as condições em que decorreram os ensaios efetuados e os parâmetros analisados, sendo posteriormente apresentados e discutidos os resultados obtidos.

No capítulo 6 são revistos os objetivos propostos no âmbito do presente trabalho. É realizada uma análise, em termos globais, do trabalho desenvolvido e são propostas algumas indicações para trabalhos futuros a realizar.

Capítulo 2

2. O solo enquanto fonte térmica

O conhecimento do comportamento do solo relativo à sua capacidade de armazenamento e de transmissão de calor revela-se, em diversos domínios da engenharia, uma informação de grande relevo. Sistemas de armazenamento subterrâneos de petróleo/gás, bombas de calor geotérmicas, permutadores de calor enterrados no solo, constituem exemplos de projetos que exigem este conhecimento para o seu dimensionamento (Alrtimi et al., 2016).

Relativamente aos sistemas que empregam o solo como fonte de climatização, as ações térmicas a que se encontram submetidos influenciam fortemente o desempenho destes. A compreensão do comportamento do fluxo de calor que ocorre no solo, o conhecimento das propriedades térmicas que o enquadram, e de como estas podem variar, revela-se fundamental para o projetista efetuar um adequado dimensionamento destes sistemas. No entanto, a transmissão de calor não se encontra apenas subordinada às características térmicas do solo, embora estas desempenhem um papel importante nesse domínio, mas também das suas características geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas, uma vez que o solo não apresenta, na generalidade dos casos, uma composição uniforme e homogénea.

No capítulo que agora se inicia faz-se uma apresentação do solo como fonte térmica, sendo inicialmente realizada uma breve introdução à sua formação e composição, referindo desde já alguns fatores intervenientes no seu comportamento térmico. Apresentam-se os principais mecanismos de transferência de calor que ocorrem nos solos, expondo detalhadamente como é que podem ocorrer. São também apresentadas as propriedades térmicas dos solos, sendo analisado os principais fatores que provocam a alteração dos seus valores. Abordam-se, ainda, os dois ciclos que enquadram o regime térmico do solo. Ainda dentro desta temática, apresentam-se os principais fatores que governam os fenómenos associados e algumas estratégias que permitem modificá-los. Por fim, apresentam-se as análises granulométricas representativas de quatro amostras de solo recolhidas no âmbito da presente dissertação.

2.1. Considerações iniciais

Segundo Batjes & Brigdges (1992) o solo mostra-se como um sistema heterogéneo, na medida que é constituído por minerais e matéria orgânica que, juntos, formam a sua fração sólida, e por espaços porosos, os quais se encontram ocupados por água e ar, de forma isolada ou conjunta.

As partículas sólidas que constituem o solo, onde os minerais imperam, resultam da ação de diferentes agentes externos, como da água, da temperatura, da vegetação e do vento.

Mediante os efeitos consequentes dos processos físicos e químicos, é ocorrido muito paulatinamente a decomposição das rochas que lhes deram origem, modificando, assim, o seu tamanho, forma física e composição mineralógica (Caputo, 1988).

De acordo com Batjes & Brigdges (1992) o conhecimento das frações granulométricas (i.e. das dimensões dos minerais) resultantes do processo de meteorização da rocha “mãe”, que formam o atual solo, constitui uma informação fulcral na identificação e caracterização dos solos. Como podemos observar na figura 2.1, em virtude das dimensões das partículas sólidas estas podem ser classificadas em diversos grupos.

Tipo	Pedra	Calhau	Seixo			Areia			Silte	Argila
			grossa	média	finas	grossa	média	finas		
Dimensão (mm)	200	60	20	6	2	0.6	0.2	0.06	0.002	
Simbologia gráfica										

Figura 2.1 - Dimensão dos diferentes tipos de partículas sólidas no solo. Adaptado de Society (2005).

Para quantificar a distribuição da dimensão das partículas que constituem o solo, recorre-se geralmente a uma análise granulométrica. Os resultados desta análise são representados graficamente, ao que se chama curva granulométrica, que permitem obter, em percentagem, os tamanhos das partículas presentes numa determinada amostra de solo, fornecendo uma aproximação da granulometria do solo (Silva, 2013).

Refere-se neste contexto que foram realizadas no âmbito do presente trabalho quatro análises granulométricas, referentes a quatro amostras de solo. Estas amostras foram recolhidas aquando da implementação de três sondas de monitorização da temperatura do solo e de um permutador de calor ar-solo, cuja apresentação encontra-se realizada no capítulo 4 da presente dissertação. Quanto à preparação e a análise das respetivas amostras, estas encontram-se exibidas no final deste capítulo.

A partir do conhecimento das percentagens das dimensões das partículas é possível, com o recurso a diagramas trilineares, determinar a designação mais adequada do solo representativo (Figueira, 2015). Na figura 2.2 é apresentado um diagrama exemplificativo, que faz referência à “Representação triangular de Feret”, integrando as possíveis combinações das proporções de argila, silte e areia. Como se pode observar, mediante os valores percentuais de cada uma das frações são, assim, traçados os respetivos segmentos de reta, desfasados entre si por um ângulo de 60°, em que o ponto de intersecção destes, permite definir, de acordo com a região do diagrama, o tipo de solo.

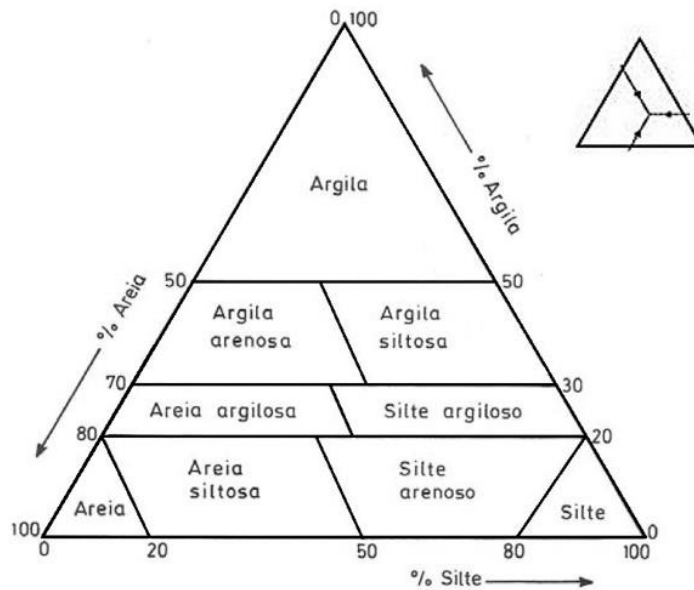


Figura 2.2 - Representação esquemática do triângulo de Feret envolvendo as possíveis combinações, em percentagem, de areia, argila e silte. Adaptado Nunes (2010) *in* Figueira (2015).

Para além dos diferentes tamanhos que os minerais podem envolver, estes podem também assumir diferentes formas. De acordo Farouki (1981) estas duas características físicas, em conjunto, definem a massa específica e a porosidade do solo que, por conseguinte, determinam o tipo de contacto entre a fração sólida. Mediante a tipologia de contacto será assim definida a capacidade das partículas em transferir calor, como evidenciam os trabalhos de Barry-Macaulay et al. (2013) e Abu-Hamdeh (2003). À vista disso, nos solos constituídos essencialmente por finos, argila e silte, o contacto entre as partículas é dado, na generalidade, como sólido-líquido-sólido. Esta tipologia de contacto advém na medida que este tipo de solos tende a apresentar um conteúdo de água elevado, incitando a criação de uma camada de água em torno de partículas sólidas. Nos solos que apresentam uma distribuição granulométrica mais grossa, como é o caso dos solos arenosos, a fração sólida encontra-se predominantemente em contacto direto, isto é, apresenta uma tipologia de contacto do tipo sólido-sólido (Farouki, 1981).

De acordo com Rees et al. (2000), a presença de água no solo contribui de forma significativa na transmissão de calor entre as partículas sólidas. Em geral, os solos saturados (i.e. com um conteúdo de água elevado) permitem que o calor seja transferido a uma taxa superior comparativamente aos solos secos, apresentando, ainda, uma maior capacidade de armazenamento de energia térmica. Nesse sentido, verifica-se que o conhecimento das condições de saturação do solo revela-se intrínseco para a análise do seu comportamento térmico.

No âmbito da hidrogeologia, o escoamento de águas subterrâneas pode também desempenhar um papel importante na transferência de calor nos solos. Segundo Rees et al. (2000) a presença

de um fluxo de água subterrâneo permite agir como um meio de transporte de calor, promovendo a sua dissipação mediante a sua passagem ao longo das varias regiões do solo.

Por outro lado, os ciclos alternados de hidratação e secagem dos solos podem também provocar alterações no seu comportamento relativo à sua transmissão de calor. Perante as variações sazonais desses processos, ocorrem fenómenos de dilatação e retração dos solos, provocando fissuras. Em virtude destas irregularidades é assim gerada uma resistência à propagação do fluxo de calor no solo (Farouki, 1981).

O grau de compactação dos solos constitui outro fator importante neste domínio. O efeito do aumento da compactação, seja esta produzida por ação natural ou por acção artificial/mecânica, leva à diminuição do volume de ar presente no solo, proporcionando, assim, um aumento da área de contacto e do número de pontos de contacto entre as suas partículas sólidas (Farouki, 1981).

Ainda assim, a transferência de calor no solo é também dependente dos minerais que o constituem, na medida que cada mineral detém as suas próprias propriedades térmicas, como será elucidado na secção 2.3 da presente dissertação.

2.2. Mecanismos de transferência de calor no solo

Sempre que existe um gradiente de temperatura dentro de um meio ou entre dois corpos que estejam em contacto, ocorre transferência de calor, que se processa segundo o sentido das temperaturas decrescentes, ou seja, da região de temperatura mais elevada para a região de temperatura mais baixa. De acordo com McCorry & Jones (2011), a quantidade de calor que é transferida depende do gradiente de temperatura existente entre as regiões consideradas, e das propriedades do meio que as separam.

A transferência de calor no subsolo pode ocorrer por diversos mecanismos, sendo que a transmissão por condução é geralmente o processo mais dominante neste meio. A convecção também desempenha um papel importante em solos permeáveis, dado a movimentação dos fluidos só ser considerável em solos que exibem um reduzido grau de saturação. Embora a transferência de calor por radiação também se verificar neste meio, é amplamente relatado na literatura a sua insignificante contribuição, quando comparada aos mecanismos de transmissão de calor referidos anteriormente (Alrtimi et al., 2016 e McCorry & Jones, 2011). Farouki (1981) acrescenta, ainda, a transferência de calor associada às mudanças de fase da fração líquida, apesar deste mecanismo desempenhar, também ele, um papel pouco contributivo neste contexto.

Apresentam-se, assim, nas subsecções que se seguem os mecanismos de transmissão de calor que podem de alguma forma ocorrer nos solos.

2.2.1. Transferência de calor por condução

A transferência de calor por condução representa o processo pelo qual o calor num dado meio, ou entre meios diferentes em contacto direto, é transferido pela colisão entre moléculas, sem que exista movimentos de natureza macroscópica (Rees et al., 2000). Dos mecanismos de transferência de calor atuantes no subsolo, Lal & Shukla (2004) consideram a transferência por condução como principal, em particular nos solos secos.

Na presença de um gradiente de temperatura dentro de um corpo, as moléculas situadas na região mais quente, ou seja, que abarcam maior conteúdo energético (energia cinética), irão transferir a sua energia translacional, rotacional e de vibração para as moléculas adjacentes que se encontram a uma temperatura inferior, ou seja, com menor conteúdo energético (Lal & Shukla, 2004).

Este mecanismo de transmissão de calor pode ocorrer em todos os constituintes do solo, líquidos, gases e sólidos. Segundo Farouki (1981), a condução de calor nos gases (i.e., ar ou vapor de água) e nos líquidos (água) pode ocorrer de forma semelhante, nomeadamente pela colisão entre moléculas, devido aos seus movimentos aleatórios, e à subsequente transferência de energia cinética entre os mesmos. No entanto, a transferência de calor por condução através do ar é pouco relevante neste meio. Pode-se ainda considerar para a condução, no caso da água, a transferência de energia térmica correspondente à rutura e à formação de ligações oxigénio-hidrogénio, ou seja, referente à organização da estrutura molecular (Rees et al., 2000 e Farouki, 1981).

Nos sólidos, a condução de calor é dada pelas vibrações moleculares. O aumento da temperatura numa dada região de um meio causará o aumento das vibrações das moléculas, que por sua vez, irão transmitir a sua energia cinética fazendo com que as moléculas contíguas sigam o mesmo exemplo, até equilibrar a distribuição da energia cinética molecular interna do meio, isto é, a sua temperatura (Hillel, 1982).

No solo a transmissão de calor por condução pode ser efetuada de diversas formas. O contacto entre as partículas sólidas representa uma possibilidade, consistindo geralmente na transferência da maior parte do calor por condução. Porém, devido às irregularidades das superfícies poderá subsistir uma resistência térmica de contacto. À vista disso, os espaços lacunares do solo poderão representar outro itinerário possível para a transferência de calor por condução (Farouki, 1981).

2.2.2. Transferência de calor por convecção

A transmissão de energia térmica por convecção refere-se ao processo em que o calor é transferido através da movimentação de um líquido ou gás (Rees et al., 2000). Este mecanismo de transferência de calor envolve predominantemente o movimento macroscópico do fluido, ainda que a transmissão de calor por condução, nomeadamente pelo contacto direto de uma

porção de fluido com um dado corpo a diferente temperatura, se encontre também envolvida neste modo de transferência de calor.

De acordo com Farouki (1981) este mecanismo de transferência pode ocorrer de duas formas no solo. A convecção natural representa umas das possibilidades, em que a movimentação do fluido (ar ou água) é resultante de variações da sua massa específica provocadas por diferenças de temperatura. Perante o contacto do fluido com uma superfície de temperatura mais elevada, uma fração deste fluido sofrerá um aumento de temperatura mediante a transferência de calor ocorrida por condução. Em consequência, a massa específica dessa porção diminuirá, tornando-se mais leve que as restantes frações de fluido situadas numa região mais longínquas do corpo (quente), resultando num deslocamento ascendente do fluido. Este fenómeno gerará assim um escoamento, nomeadamente uma corrente de convecção (natural). Este tipo de transmissão de calor é geralmente irrelevante nos solos, para que o seu efeito seja notado os vazios (poros) do solo deverão abarcar mais de 8 mm de comprimento (Russell, 1935 *in* Farouki, 1981).

A outra possibilidade representa a transferência de calor por convecção forçada. Neste caso, a movimentação do fluido é realizada por ação de agentes externos, nomeadamente diferenças de pressão, em que o fluido (ar ou água) é forçado a mover-se através dos poros existentes no solo, fissuras, entre outros espaços lacunares (Farouki, 1981). Segundo o mesmo autor, um exemplo deste fenómeno representa o fluxo de águas subterrâneas, sendo que na generalidade dos casos, estes encontram-se orientados perpendicularmente à direção do fluxo de calor, funcionando assim como meio de transporte de energia térmica para outras zonas do solo. Johansen (1975) *in* Farouki (1981), refere que estes efeitos de transferência de calor por convecção forçada podem provocar um aumento em cerca de 20% da condutibilidade térmica dos solos arenosos, sobretudo aqueles que apresentam granulometria muito grossa.

2.2.3. Transferência de calor por radiação

A transferência de calor por radiação difere dos modos de transmissão de energia térmica referenciados anteriormente, no sentido de não necessitar de um meio físico para ocorrer uma permuta de calor entre dois corpos. A energia radiante é, assim, transmitida através de ondas eletromagnéticas (Rees et al., 2000). Este mecanismo de transferência de calor ocorre em todos corpos e estados físicos da matéria, podendo também dar-se no vácuo. Quanto mais elevada for a temperatura do corpo/meio maior será a taxa de transferência de energia radiante, uma vez que se indica proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo, como define a Lei de Stefan-Boltzmann.

No solo, Rees et al. (2000) refere que em norma o contributo da radiação na transferência de calor é negligenciado. Segundo Lopes (2014) as partículas sólidas do solo situadas a baixas profundidades proporcionam, no geral, uma reduzida transferência de energia radiante em detrimento da transmissão de calor por condução e convecção, imperativas neste domínio.

Contudo, Farouki (1981) refere que este mecanismo de transferência de calor pode evidenciar-se revelante para solos granulares secos. À vista disso, Wakao & Kato (1969) *in* Farouki (1981) aludem que nas partículas sólidas que envolvem um diâmetro de 20 μm , o efeito da radiação pode constituir cerca de 10% da sua transferência de calor global, perante condições de temperatura normais.

2.2.4. Transferência de calor associada à mudança de fase

Dos mecanismos mencionados nas subsecções anteriores, Farouki (1981), Tidall et al. (1999) e Rees et al. (2000) citam outro processo cuja transferência de calor pode ocorrer no solo, nomeadamente através da mudança de estado do fluido.

Este modo de transmissão de calor pode suceder dos processos de vaporização, condensação, solidificação e fusão (Farouki, 1981 e Tidall et al., 1999). Segundo Tidall et al. (1999) para cada um desses fenómenos ocorrer é necessário que o solo circundante forneça ou absorva calor ao fluido, sendo que a quantidade de energia térmica necessária para realizar essa transição de fase, denomina-se por calor latente.

Relativamente aos processos de evaporação e condensação, Farouki (1981) refere que o aumento da temperatura em solos secos pode provocar, em determinadas regiões, a evaporação do pouco conteúdo de água nele existente. Como consequência desse facto, a pressão de vapor nesta região sofrerá um aumento, sendo que o vapor de água irá deslocar-se pelos espaços lacunares do solo para regiões de baixa pressão de vapor, onde irá arrefecer. Caso o vapor de água condense, será assim libertada uma quantidade de calor fruto da mudança de fase. De forma análoga se sucede no processo de evaporação da água, sendo que neste caso ocorre uma absorção de energia térmica. Nos processos de solidificação e fusão, referente a solos submetidos a temperaturas muito baixas, ocorre de igual forma uma transferência de calor durante as transições de fase do fluido, nomeadamente ocorrendo a libertação de energia térmica no processo de solidificação e absorção durante a fusão.

Em suma, encontram-se exemplificados na figura 2.3 alguns dos mecanismos de transferência de calor ocorrentes no solo citados anteriormente.

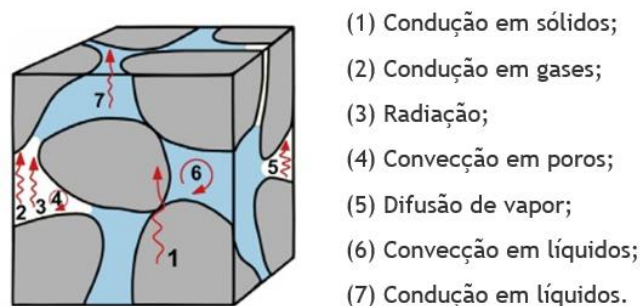


Figura 2.3 - Mecanismos de transferência de calor nos solos. Adaptado de Johansen (1975) *in* Alrtimi et al. (2016).

2.3. Propriedades térmicas dos solos

Como vimos anteriormente a composição do solo é raramente uniforme, podendo este apresentar poros constituídos por ar e/ou água, nos seus variados estados físicos, assim como partículas sólidas envolvendo diversas formas e tamanhos. À vista disso, as propriedades térmicas do solo são assim dependentes das suas características e das proporções da cada fase que o constituem (i.e. sólido, líquido e gasosos) (Rees et al., 2000).

Neste sentido são assim apresentadas nas subsecções que se seguem as propriedades térmicas que enquadram este domínio, nomeadamente a condutibilidade térmica, resistividade térmica, capacidade térmica (calor específico e calor específico volumétrico) e a difusividade térmica. Para cada uma dessas propriedades é efetuada uma análise detalhada dos principais fatores que interferem no seu valor e de que forma ocorre essa interferência.

2.3.1. Condutibilidade térmica

Em termos matemáticos, a condutibilidade térmica define a quantidade de calor transferida, por unidade de tempo, através de um corpo de espessura e área de secção transversal unitária, sendo sujeito a um gradiente de temperatura, também ele unitário, imposto na direção do fluxo de calor. No fundo, esta propriedade descreve a capacidade de um corpo em transferir calor por condução. De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI) este é expresso em W/mK. Segundo Barry-Macaulay et al. (2013) a condutibilidade térmica representa a propriedade térmica mais importante do solo para o dimensionamento de sistemas que utilizam este meio como fonte ou dissipador de calor.

Esta propriedade apresenta-se dependente de um conjunto variado de fatores, como é o caso do tamanho e da forma das partículas sólidas que compõem o solo, da porosidade, do conteúdo de água, da composição mineralógica, da massa específica e da temperatura (Alrtimi et al., 2016).

Contudo, Banks (2008) refere que no âmbito da “termogeologia” o efeito deste último fator pode ser negligenciado na maioria dos casos, podendo ser considerado como constante em virtude da reduzida gama de temperaturas que enquadra este domínio. Todavia, a condutibilidade térmica do solo revela-se dependente do estado físico em que água se encontra nos seus interstícios. À vista disso, Brandl (2006) refere que no processo de congelamento dos solos (i.e. solidificação da água que ocupa os espaços lacunares) ocorre um aumento da condutibilidade térmica do solo, na medida que o gelo possui uma condutibilidade superior à da água líquida.

Por outro lado, o grau de saturação do solo detém um efeito determinante sobre a sua condutibilidade térmica. A substituição total ou parcial do ar, presente nos espaços vazios do solo, por água, permite estabelecer pontes de ligação entre os diversos pontos de contacto existentes entre as partículas sólidas. Estas ligações são denominadas de pontes térmicas, as

quais favorecem o contacto entre as partículas e, conseqüentemente, a sua capacidade de transferência da sua energia térmica. Um aumento significativo da condutibilidade térmica do solo será causado até que uma película de água envolva toda a superfície das partículas do solo. Qualquer aumento do conteúdo de água proporcionará apenas o preenchimento dos vazios existentes, resultando num aumento menos denunciado da condutibilidade térmica do solo (Alrtimi et al., 2016). Este fenómeno pode ser observado na imagem ilustrativa da figura 2.4.

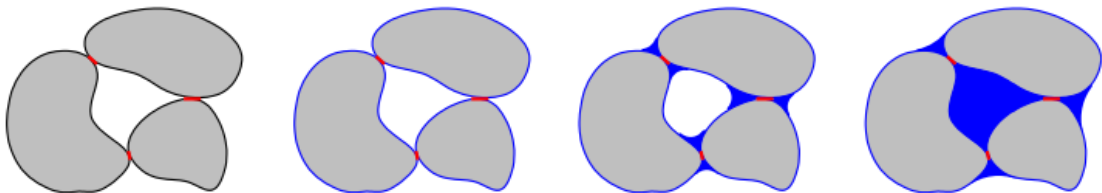


Figura 2.4 - Esquemática do aumento do conteúdo de água num meio poroso. Adaptado de Roth (2012).

O efeito da variação do grau de saturação na condutibilidade térmica de diferentes tipos de solo pode ser visualizado na figura 2.5, representando um estudo realizado por Barry-Macaulay et al. (2013). É possível observar que a condutibilidade térmica para solos constituídos essencialmente por areia, aumenta inicialmente de forma súbita para valores reduzidos de conteúdo de água, sendo esta tendência atenuada mediante o aumento do grau de saturação do solo. Este fenómeno não se verifica nos solos compostos por partículas mais finas, como é caso de argila e silte, em que se constata um crescimento aproximadamente linear da condutibilidade térmica face ao aumento do grau de saturação.

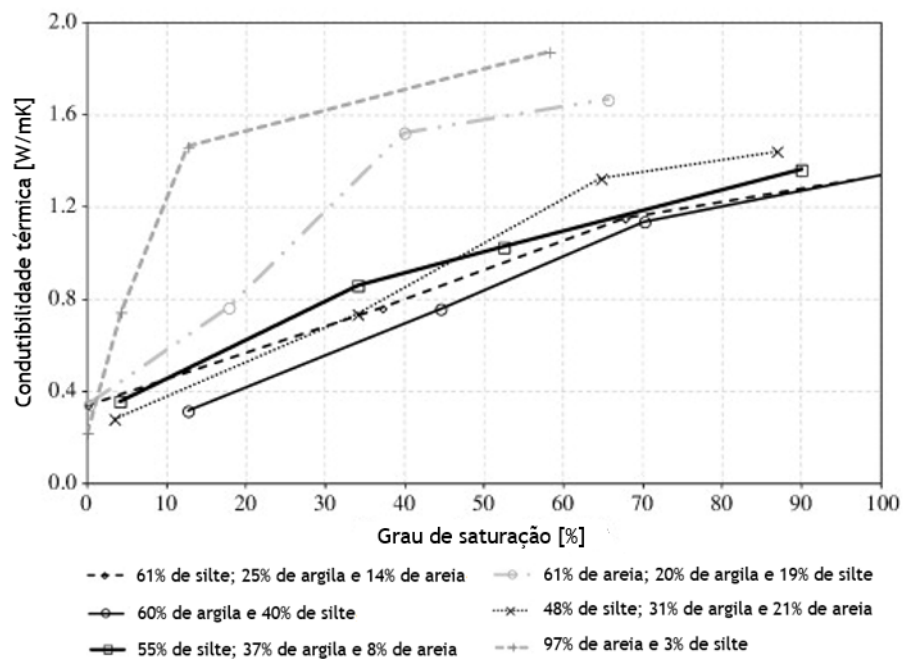


Figura 2.5 - Efeito do grau de saturação na condutibilidade térmica de diferentes tipos de solos. Adaptado de Barry-Macaulay et al. (2013).

Este fato é dado pela diferença do tamanho das partículas, uma vez que os solos que abrangem partículas de maior tamanho envolvem menos pontos de contacto entre eles, sendo apenas necessário uma reduzida quantidade de água para formar as referidas pontes térmicas. Em consequência, a condutibilidade térmica aumenta bruscamente uma vez que a quantidade de calor transferido através da água é superior à quantidade transferida pelo ar. Nos solos finos, devido à existência de um maior número de pontos de contacto entre as partículas sólidas, necessitam de um conteúdo de água mais elevado para gerar as pontes térmicas, ocorrendo, assim, um aumento quase linear da condutibilidade térmica até que todo este processo se desenvolva (Barry-Macaulay et al., 2013).

Além disso, Abu-Hamdeh (2003) refere que os solos arenosos apresentam muitas vezes uma condutibilidade térmica mais elevada que os solos argilosos, no sentido de apresentarem, na generalidade dos casos, uma composição mineralógica prevalecida por quartzo. À vista disso, visualiza-se de forma clara através da tabela 2.1 que o quartzo revela-se o mineral que detém um maior valor de condutibilidade térmica, diferenciando-se dos valores típicos que enquadram a maioria dos minerais. Portanto, os solos que denunciam um elevado conteúdo de quartzo revelam-se aqueles que proporcionam um maior fluxo de calor.

Por outro lado, qualquer alteração do volume de ar no solo irá também afetar o processo de transmissão de calor por condução. De acordo com Barry-Macaulay et al. (2013), o aumento da massa específica do solo provoca, independentemente do valor de conteúdo de água, um aumento do valor da sua condutibilidade térmica. Na medida que em função do aumento da massa específica do solo, o volume de vazios será reduzido, sendo que a transmissão de calor ocorrerá essencialmente pelas partículas sólidas do solo, melhorando as características de condução interfacial levando ao aumento do fluxo de calor entre estas.

Apresentam-se na tabela 2.1 alguns valores típicos de condutibilidade térmica para diferentes tipos de solo, minerais e outros constituintes que podem integrar de alguma forma o meio ambiente subterrâneo.

Tabela 2.1 - Condutibilidade térmica de alguns tipos de solo, minerais e outros constituintes. Adaptado de ^(*)McCorry & Jones (2011), segundo a norma alemã VDI 4640, ^(**)Banks (2008) e ^(***)Hillel (1982).

		Condutibilidade térmica [W/mK]	
		Gama de valores	
Tipos de solo	Argila/silte	Seca	0,4 - 1,0 ^(*)
		Saturada	1,1 - 3,1 ^(*)
	Areia	Seca	0,3 - 0,9 ^(*)
		Húmida	1,0 - 1,9 ^(*)
		Saturada	2,0 - 3,0 ^(*)
	Seixo	Seco	0,4 - 0,9 ^(*)
Saturado		1,6 - 2,5 ^(*)	
Minerais	Mica	2,0 - 2,3 ^(**)	
	Quartzo	7,7 ^(**)	
	Calcite	3,6 ^(**)	
	Feldspatos potássicos	2,3 - 2,5 ^(**)	
	Plagióclase	1,5 - 2,3 ^(**)	
Outros	Ar (a 10 °C)	0,025 ^(***)	
	Água (a 10 °C)	0,57 ^(***)	
	Gelo (a 0 °C)	2,2 ^(***)	

2.3.2. Resistividade térmica

A resistividade térmica do solo é apresentada como outro parâmetro fundamental na avaliação da transferência de calor neste meio. Segundo Singh & Devid (2000), esta propriedade térmica representa uma medida da resistência oferecida pelo solo à passagem de calor através deste. Esta propriedade revela-se o inverso da condutibilidade térmica, sendo assim expressa em mK/W.

Nesse sentido, os fatores que se encontram associados à variação da condutibilidade térmica dos solos, representam de igual forma os fatores que provocam alterações na sua resistividade térmica, atuando, no entanto, de forma inversa no seu valor. De acordo com Cai et al. (2015), o conteúdo de água nos solos constitui um dos fatores que mais influência tem nesta propriedade térmica. Nesse sentido, os solos saturados revelam, na generalidade dos casos, uma resistividade térmica mais reduzida, em virtude da água que preenche os poros apresentar um valor de resistividade mais baixa do que o ar.

2.3.3. Capacidade térmica

A capacidade térmica representa uma das propriedades do solo que controla as variações da sua temperatura, e define a capacidade deste em armazenar energia térmica (Alnefaie & Abu-Hamdeh, 2013). Por outras palavras, esta propriedade térmica é definida como a quantidade de calor necessária para que um determinado corpo aumente a sua temperatura de um Kelvin, ou de um grau Celsius, sendo assim expressa em J/K.

À semelhança das propriedades analisadas anteriormente, a capacidade térmica encontra-se dependente de diversos fatores, os quais se podem dividir essencialmente em dois grupos. O primeiro grupo enquadra os fatores referentes ao próprio solo, que inclui a sua composição mineralógica e o conteúdo de matéria orgânica. Por sua vez, o segundo grupo envolve os fatores que podem de alguma forma ser alterados pelo exterior, como é o caso da massa específica e do conteúdo de água no solo, sendo que este último constitui o fator que desempenha uma maior influência na capacidade térmica dos solos (Alnefaie & Abu-Hamdeh, 2013). Segundo Chesworth et al. (2016) os solos secos exibem variações de temperatura mais elevadas em virtude da sua reduzida capacidade térmica comparativamente aos solos que contêm maior conteúdo de água.

Através da capacidade térmica e da massa específica do solo, podem ainda ser obtidas outras duas propriedades que caracterizam a capacidade de armazenamento de energia térmica do solo. Essas propriedades são, assim, o calor específico e o calor específico volumétrico, que por sua vez também dependem dos fatores anteriormente referidos.

2.3.3.1. Calor específico

O calor específico representa a quantidade de calor necessária para aumentar um Kelvin, ou um grau Celsius, de um quilograma de matéria, sendo este expresso em kJ/kgK.

Em virtude dos fatores evidenciados na subsecção anterior, apresenta-se na figura 2.6 um gráfico referente a um estudo desenvolvido por Abu-Hamdeh (2003), onde analisou o efeito da variação do conteúdo de água no calor específico de dois tipos de solo (arenoso e argiloso). Em ambos os solos é possível observar que o aumento do conteúdo de água proporciona um incremento do valor do calor específico do solo, verificando-se que existe uma relação linear entre estes dois parâmetros até atingir um conteúdo de água de aproximadamente 15%. Quando os respetivos solos são submetidos a quantidades de água superiores, observa-se, que o calor específico do solo constituído essencialmente por argila visa um aumento mais notório que no solo arenoso. Esta dissemelhança é justificada pela adsorção da água nos poros, sendo que os solos de granulometria mais fina proporcionam uma maior capacidade de retenção de água do que os solos granulares. À vista disso, é assim formada uma película de água circundante às partículas sólidas, resultando num incremento mais significativo do calor específico dos solos argilosos do que nos solos arenosos.

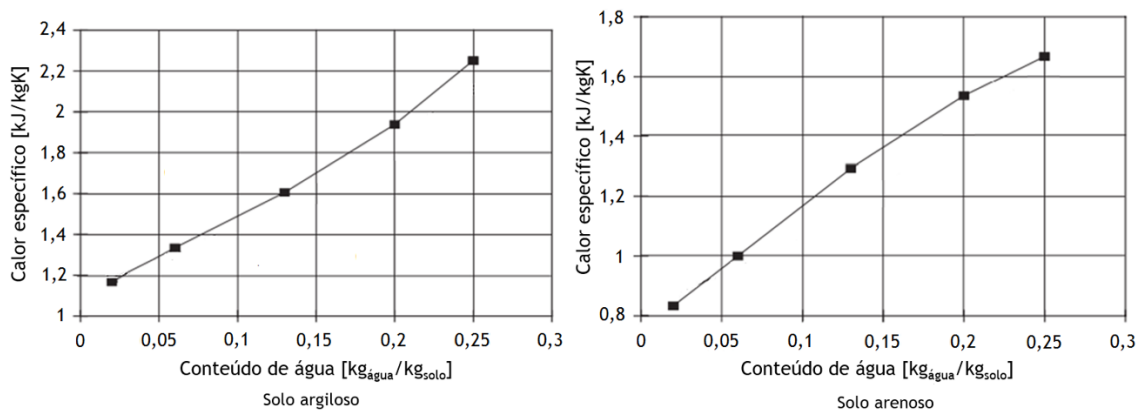


Figura 2.6 - Efeito do aumento do conteúdo de água no calor específico de um solo argiloso e um solo arenoso, para uma massa específica de 1300 kg/m³. Adaptado de Abu-Hamdeh (2003).

Resultados semelhantes foram obtidos pelos autores Alnefaie & Abu-Hamdeh (2013), adicionando à justificação de Abu-Hamdeh (2003) as diferenças ocorridas na composição mineralógica dos solos. Na maioria dos casos os solos arenosos contêm uma maior quantidade de quartzo, sendo que este mineral apresenta um calor específico mais reduzido que a maioria dos minerais. Em virtude deste facto, os solos argilosos poderão manifestar um calor específico mais elevado comparativamente aos solos arenosos. Lawrence & Slater (2008) referenciam ainda que os solos que envolvem um elevado conteúdo de matéria orgânica, expõem valores de calor específico superiores comparativamente aos solos constituídos essencialmente por minerais.

Apresentam-se na tabela 2.2 alguns valores típicos encontrados na literatura de calor específico de diferentes tipos de solo, minerais, e outros constituintes que podem integrar de alguma forma este meio.

Tabela 2.2 - Calor específico de alguns tipos de solo, minerais e outros constituintes. Adaptado de ^(*)McCorry & Jones (2011), segundo a norma alemã VDI 4640, ^(**)Rees et al. (2000) e ^(***)Farouki (1981).

		Calor específico [J/kgK]	
		Gama de valores	
Tipos de solo	Argila/silte	Seca	800 - 833 ^(*)
		Saturada	1000 - 1273 ^(*)
	Areia	Seca	722 - 727 ^(*)
		Húmida	842 - 1000 ^(*)
		Saturada	1158 - 1217 ^(*)
	Seixo	Seco	722 - 727 ^(*)
Saturado		1130 - 1158 ^(*)	
Minerais	Moscovite	870 ^(**)	
	Quartzo	799 ^(**)	
	Biotite	862 ^(**)	
Outros	Ar (a 20 °C)	1005 ^(***)	
	Água (a 10 °C)	4186 ^(**)	
	Gelo (a 0 °C)	1884 ^(**)	

2.3.3.2. Calor específico volumétrico

Por sua vez, o calor específico volumétrico representa a quantidade de calor necessária para aumentar um Kelvin, ou um grau Celsius, de um metro cúbico de matéria. Esta propriedade corresponde ao produto entre o calor específico e a massa específica, sendo assim expressa em $\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$.

Segundo Hillel (1982) o calor específico volumétrico depende do tipo de solo, da massa específica e do conteúdo de água. À vista disso, pode visualizar-se na figura 2.7 o efeito da variação do conteúdo de água e da massa específica no calor específico volumétrico de dois tipos de solo (arenoso e argiloso), referente a um estudo realizado por Alnefaie & Abu-Hamdeh (2013). Observa-se que o valor do calor específico volumétrico apresenta um comportamento linear mediante o aumento do conteúdo de água para ambos os tipos de solo, e, para as diferentes massas específicas consideradas. Ainda assim, verifica-se que o aumento deste último proporciona um incremento do valor do calor específico volumétrico tanto para o solo argiloso como para o solo arenoso, resultante da diminuição da porosidade do solo e, por consequência, do aumento da quantidade da fração sólida por unidade de volume.

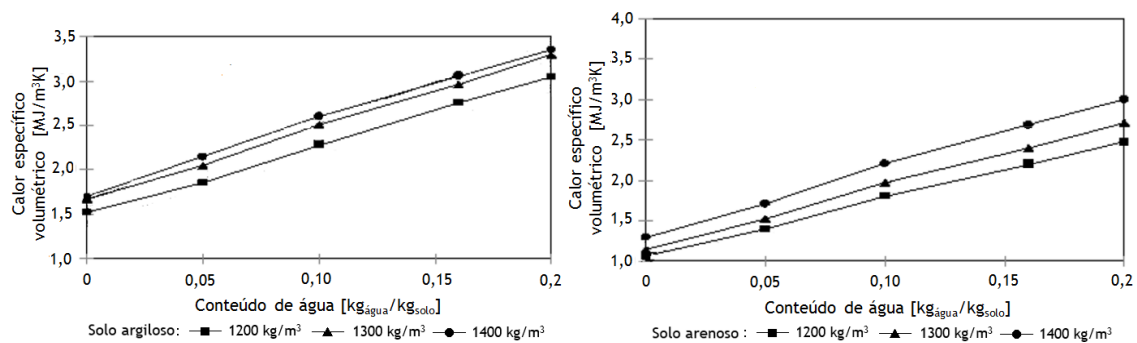


Figura 2.7 - Variação do calor específico volumétrico de um solo argiloso e um solo arenoso em função do conteúdo de água e da massa específica. Adaptado de Alnefaie & Abu-Hamdeh (2013).

Apresentam-se na tabela 2.3 alguns valores típicos do calor específico volumétrico de diferentes tipos de solo e minerais. Relativamente aos tipos de solo considerados, é possível observar que indiciam valores aproximadamente similares, dado a este parâmetro ser dependente tanto do calor específico como da massa específica.

Tabela 2.3 - Calor específico volumétrico de alguns tipos de solo e minerais. Adaptado de ^(*)McCorry & Jones (2011), segundo a norma alemã VDI 4640, e ^(**)Banks (2008).

		Calor específico volumétrico [kJ/m ³ K]	
		Gama de valores	
Tipos de solo	Argila/silte	Seca	1500 - 1600 ^(*)
		Saturada	2000 - 2800 ^(*)
	Areia	Seca	1300 - 1600 ^(*)
		Húmida	1600 - 2200 ^(*)
		Saturada	2200 - 2800 ^(*)
	Seixo	Seco	1300 - 1600 ^(*)
Saturado		2200 - 2600 ^(*)	
Minerais	Quartzo	1900 - 2000 ^(**)	
	Calcite	2240 ^(**)	
	Feldspatos potássicos	1600 - 1800 ^(**)	
	Plagioclase	1640 - 2210 ^(**)	
	Mica	2000- 2300 ^(**)	

2.3.4. Difusividade térmica

A difusividade térmica é definida como o quociente entre a condutibilidade térmica e o produto entre o calor específico e massa específica, e é expressa em m²/s (Lehnert, 2014). Segundo Brandl (2006), esta propriedade térmica dita a profundidade e a velocidade de propagação da temperatura no solo.

Segundo Farouki (1981) os solos que apresentam um valor de difusividade térmica elevado são propensos a variações mais significativas e mais rápidas da sua temperatura. Dessa forma pode-se afirmar que o conhecimento deste parâmetro se revela crucial na compreensão do comportamento do fluxo de calor no solo.

À semelhança das outras propriedades térmicas, a difusividade é também influenciada por diversos fatores. O conteúdo de água constitui um deles, sendo que a sua influência no comportamento desta propriedade pode ser visualizada na figura 2.8 para dois tipos de solo (arenoso e argiloso). De acordo com o estudo de Abu-Hamdeh (2003), é possível verificar que a difusividade térmica do solo arenoso aumenta inicialmente de forma súbita para valores reduzidos de conteúdo de água, até atingir um valor máximo. Logo depois, ocorre um decaimento repentino até permanecer aproximadamente constante, mas com carácter decrescente, até que os poros do solo sejam preenchidos completamente por água. Este comportamento da difusividade térmica deve-se ao aumento mais pronunciado da condutibilidade térmica, do que ao calor específico volumétrico, para valores reduzidos de conteúdo de água, como referido anteriormente. Com o aumento da quantidade de água nos poros, o valor da condutibilidade térmica tende a ser atenuado, sendo que o seu pequeno

aumento não permite compensar o aumento quase linear da capacidade térmica volumétrica, resultando, assim, na diminuição do valor da difusividade.

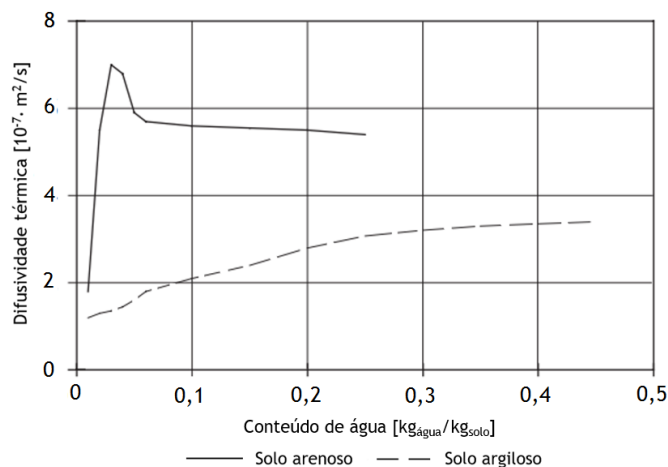


Figura 2.8 - Variação da difusividade térmica com o conteúdo de água para dois tipos solos (arenosos e argilosos). Adaptado de Abu-Hamdeh (2003).

Todavia, este fenómeno não se verifica para o solo argiloso em virtude de ambas as propriedades, condutibilidade térmica e calor específico volumétrico, apresentarem um aumento praticamente linear perante o aumento do conteúdo de água no solo. Contudo, verifica-se que o valor da difusividade térmica tende a decair ligeiramente em função do aumento do conteúdo de água, sendo este facto justificado pelo aumento menos pronunciado da condutibilidade térmica do solo, como fundamentado na secção 2.3.1 do presente trabalho.

Além disso, Abu-Hamdeh (2003) refere que a composição mineralógica do solo pode influenciar o comportamento desta propriedade. Geralmente os solos arenosos apresentam um valor de difusividade mais elevado que os solos essencialmente constituídos por argila, na medida que, na maioria das vezes, os solos arenosos apresentam um maior conteúdo de quartzo.

Segundo Farouki (1981) a variação da massa específica representa outro fator que influencia a difusividade térmica dos solos. Para além desta última ser dependente da condutibilidade térmica e da capacidade térmica volumétrica, estas por sua vez também variam com a massa específica. Como analisado anteriormente, o aumento massa específica provoca o aumento linear da capacidade térmica volumétrica, no entanto a difusividade não aumenta proporcionalmente devido à condutibilidade térmica não apresentar um comportamento regular.

Ainda assim, Farouki (1981) refere que a mudança de estado físico da água intersticial, nomeadamente de líquido para sólido, fomenta um incremento do valor da difusividade térmica do solo, devido à elevada condutibilidade térmica e ao reduzido valor de calor específico do gelo, em comparação com a água líquida.

Apresentam-se na tabela 2.4 alguns valores típicos da difusividade térmica de diferentes tipos de solo e minerais, os quais foram obtidos de acordo com o quociente entre os valores de condutibilidade térmica e calor específico volumétrico apresentados nas tabelas 2.1 e 2.3.

Tabela 2.4 - Difusividade térmica de alguns tipos de solo e minerais. Adaptado de ^(*)McCorry & Jones (2011), segundo a norma alemã VDI 4640, e ^(**)Banks (2008).

		Difusividade térmica [m ² /s]	
		Gama de valores	
Tipos de solo	Argila/silte	Seca	$2,67 \cdot 10^{-7} - 6,25 \cdot 10^{-7}^{(*)}$
		Saturada	$5,50 \cdot 10^{-7} - 1,11 \cdot 10^{-7}^{(*)}$
	Areia	Seca	$2,31 \cdot 10^{-7} - 5,63 \cdot 10^{-7}^{(*)}$
		Húmida	$6,25 \cdot 10^{-7} - 8,64 \cdot 10^{-7}^{(*)}$
		Saturada	$9,09 \cdot 10^{-7} - 10,71 \cdot 10^{-7}^{(*)}$
	Seixo	Seco	$3,08 \cdot 10^{-7} - 5,63 \cdot 10^{-7}^{(*)}$
Saturado		$7,27 \cdot 10^{-7} - 9,62 \cdot 10^{-7}^{(*)}$	
Minerais	Quartzo	$38,50 \cdot 10^{-7} - 40,53 \cdot 10^{-7}^{(**)}$	
	Calcite	$16,07 \cdot 10^{-7}^{(**)}$	
	Feldspatos potássicos	$13,89 \cdot 10^{-7} - 14,38 \cdot 10^{-7}^{(**)}$	
	Plagióclase	$9,15 \cdot 10^{-7} - 10,41 \cdot 10^{-7}^{(**)}$	
	Mica	$9,09 \cdot 10^{-7} - 10,41 \cdot 10^{-7}^{(**)}$	

2.4. Regime térmico do solo

As camadas mais superficiais do solo encontram-se sujeitas a variações contínuas de temperatura, em resposta às alterações meteorológicas a que este está sujeito ao longo do ano.

Uma vez que a superfície do solo se encontra em contacto com o meio ambiente externo, pode-se assim retratar esta como uma superfície ativa, em que a sua temperatura é determinada pelo balanço entre o calor recebido pela radiação solar durante o período diurno, pelo calor perdido durante a noite por radiação para a atmosfera, pelas trocas de calor por condução e convecção com o ar exterior, pelas perdas de calor por evapotranspiração e pelas trocas de calor entre a superfície do solo e as camadas mais profundas. O fluxo de calor que é gerado no solo define assim o seu regime térmico, nomeadamente a variação da sua temperatura em função da profundidade, tempo e época do ano (Chesworth et al., 2016).

Segundo Chesworth et al. (2016), Pregitzer & King (2005) e Lal & Shukla (2004) o regime térmico do solo, nas suas camadas mais superficiais, pode ser caracterizado por dois tipos de ciclos, diário e sazonal (ou anual).

Observa-se na figura 2.9 um gráfico exemplificativo de um ciclo diário, apresentado no trabalho de Chesworth et al. (2016), exibindo as variações típicas de temperatura do solo em diversas profundidades para um dia típico de Verão. O padrão das temperaturas em função do tempo, em todas as profundidades consideradas, assume uma forma de onda sinusoidal em virtude das variações de temperatura exterior e da radiação solar incidente na superfície do solo. Observa-se que a amplitude térmica diminui com o aumento da profundidade do solo, ou seja, ocorre uma redução da diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima, gerada pelo seu aquecimento durante o dia e pelo seu arrefecimento em período noturno. Além disso, pode verifica-se adicionalmente que a temperatura do solo, mediante o aumento da profundidade, tende a exibir um desfasamento temporal, nomeadamente um atraso, face às camadas mais próximas da superfície, atingindo o seu valor de pico em tempo posterior.

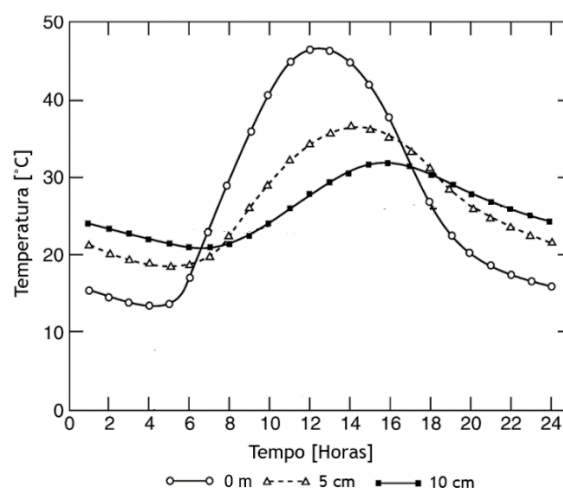


Figura 2.9 - Variação diária da temperatura do solo para várias profundidades e para um dia típico de verão. Adaptado de Chesworth et al. (2016).

É de referir que este fenómeno ocorre em período de Inverno, porém existe uma inversão das temperaturas, no sentido de que as camadas mais longínquas da superfície indiciam uma temperatura mais elevada que a temperatura das restantes camadas situadas acima desta e, nomeadamente, da temperatura exterior.

Quanto ao ciclo sazonal das temperaturas do solo, apresentado na figura 2.10, este varia de forma semelhante ao ciclo diário, ou seja, a temperatura em função do tempo apresenta uma forma de onda sinusoidal. No entanto, verifica-se um atraso temporal e a atenuação da variação da temperatura do solo mais notório perante profundidades superiores. Nas suas camadas mais profundas verifica-se, assim, que a temperatura ao longo do ano tende a permanecer aproximadamente constante, em virtude da mitigação das influências das trocas de calor entre o subsolo e o ambiente externo. Em período de Verão, correspondente à zona central do gráfico, as camadas do solo mais afastadas da superfície apresentam valores de temperatura inferiores às verificadas pelas camadas mais próximas. Em oposição, durante o período de Inverno, representado nas extremidades do gráfico, a temperatura do solo na zona mais

longínqua da superfície apresenta valores de temperatura superiores comparativamente às camadas situadas acima deste.

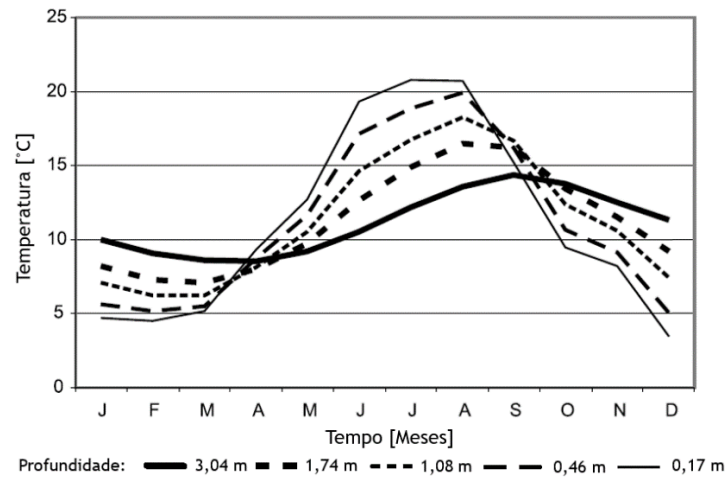


Figura 2.10 - Variações sazonais de temperatura em várias profundidades, observado em Oxford (Reino Unido) em 1899 por Rambaut (1900) *in* Banks (2008).

Segundo Bansal & Mathur (2009), a atenuação da temperatura do solo e o seu atraso mediante o avanço em profundidade, é justificado pela elevada inércia térmica do solo. De acordo com Spiga et al. (2011), a inercia térmica é governada pela condutibilidade térmica e pelo seu calor específico volumétrico, os quais, em conjunto, descrevem a capacidade do solo em absorver e armazenar calor nos períodos de aquecimento, assim como, da sua capacidade em dissipá-lo em tempo posterior.

Segundo Chesworth et al. (2016), os regimes térmicos do solo são influenciados principalmente pelas propriedades térmicas que lhe são inerentes e pelo balanço energético à sua superfície.

Como vimos no subcapítulo 2.3, as propriedades térmicas dos solos variam em grande parte pelo conteúdo de água que este envolve. De acordo com Chesworth et al. (2016), as variações diárias e sazonais de temperatura podem ser reduzidas pelo aumento do conteúdo de água no solo, em virtude do aumento ocasionado da sua capacidade e condutibilidade térmica.

À vista disso, apresenta-se na tabela 2.5 a amplitude térmica diária registada para diferentes profundidades, onde pode ser observado que os solos que geralmente apresentam maior conteúdo de água, como é o caso do solo argiloso, apresentam uma variação menos pronunciada da temperatura nas várias camadas consideradas comparativamente ao solo composto por areia.

Tabela 2.5 - Efeito do tipo de solo na amplitude térmica diária a diferentes profundidades. Adaptado de Baver et al. (1972) in Chesworth et al. (2016).

Profundidade [cm]	Amplitude térmica [°C]		
	Areia	Argila	Turfa
0	40,0 °C	21,5 °C	23,2 °C
5	19,4 °C	13,7 °C	13,9 °C
10	12,3 °C	7,7 °C	5,4 °C
20	4,8 °C	2,2 °C	0,7 °C
30	1,6 °C	0,6 °C	0,3 °C

Por outro lado, o comportamento térmico de um solo face à ação da radiação solar bem como das trocas de calor entre a sua superfície e o ar externo, pode ser alterado pelo tipo de cobertura que este possui. A utilização de vegetação constitui uma das possíveis soluções. Segundo Ahmed et al. (2016) e Cook (1989), a utilização de uma cobertura com relva permite minimizar a incidência direta da radiação solar sobre a superfície solo e, por consequência, diminuir as oscilações diárias e sazonais da temperatura da sua superfície e subsequentes camadas mais profundas. Além disso, Chesworth et al. (2016) refere que a utilização de vegetação atua como uma camada isoladora que permite diminuir as perdas ou os ganhos de calor em período de Inverno e de Verão, respetivamente. Apresenta-se na figura 2.11 um gráfico que compara a temperatura de um solo sem qualquer tipo de tratamento e de um solo coberto por relva curta. Verifica-se de forma clara a diminuição da temperatura do solo conseguido pela utilização de um solo relvado.

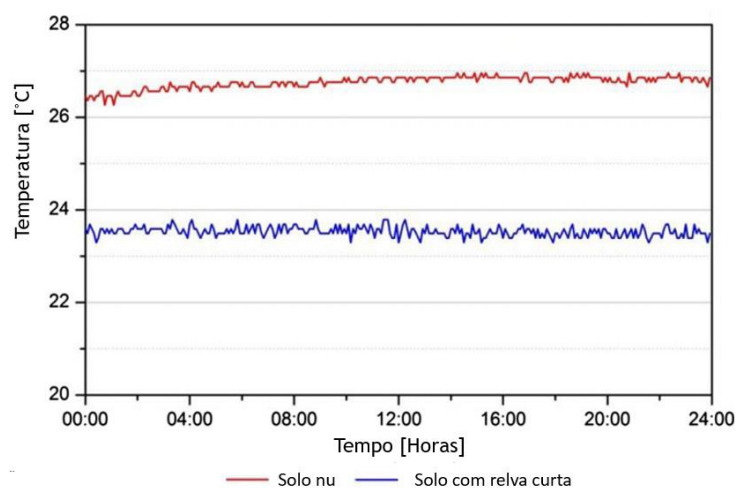


Figura 2.11 - Variação da temperatura da superfície de um solo sem tratamento (descoberto) e um solo com relva. Adaptado de Ahmed et al. (2016).

Por outro lado, Givoni (2007) revela outro tipo de estratégia para promover a proteção da superfície do solo face à incidência da radiação solar, nomeadamente cobrindo a superfície com uma camada de seixo e mantendo-a húmida durante o período da noite, por um sistema de irrigação. Para além desta estratégia proporcionar um abrigo à superfície do solo da radiação

solar incidente durante o dia, permite em período noturno aumentar as trocas de calor por condução e convecção entre o solo e o ar ambiente, e, as perdas de calor por evaporação.

Por outro lado, Chesworth et al. (2016) referem que o aquecimento do solo gerado pelos efeitos da radiação é bastante dependente da latitude a que este se enquadra. A latitude define o ângulo de incidência dos raios solares sobre a Terra, assim sendo a radiação solar interceptada pela superfície do solo será diferente mediante a localização latitudinal a que este se enquadra. Segundo os autores, a variação da latitude é responsável pela maioria das diferenças dos regimes térmico dos solos e das diferenças de temperatura das camadas mais superficiais do solo. De acordo com Baver et al. (1972) *in* Chesworth et al. (2016) verifica-se que há um aumento gradual da temperatura do solo, em todas as profundidades consideradas por estes, mediante o aumento da latitude.

2.5. Análises granulométricas

Como referido anteriormente na secção 2.1, na implementação de três sondas de monitorização da temperatura do solo e de um permutador de calor ar-solo, foram recolhidas amostras correspondentes a cada solo. É apresentado nesta secção todo o processo efetuado para a realização da identificação e caracterização de cada solo.

É de referir que tanto a preparação das amostras como as suas respetivas análises granulométricas foram realizadas no laboratório de Mecânica dos Solos (Geotecnia), do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior.

Após a a recolha e a devida identificação das amostras de solo das quatro localizações, apresentadas na figura 2.12, estas foram sujeitas, segundo a Especificação E 195 do LNEC (LNEC, 1966), a um processo de preparação, designado de “Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação”, a fim de agregar as condições para a realização da classificação dos solos em estudo.



Figura 2.12 - Fotografia das quatro amostras de solos antes da sua preparação.

Como pode ser observado na figura 2.13, para a preparação das amostras, estas foram inicialmente secas numa estufa a 80°C, durante alguns dias, de forma remover todo o conteúdo de água. Após as amostras secas, procedeu-se à sua pesagem.



Figura 2.13 - Fotografias relativas ao procedimento de preparação das amostras (secagem e pesagem).

Após a preparação das amostras, procedeu-se à análise granulométrica por peneiração húmida de cada amostra de solo em estudo, realizada segundo a especificação E239 do LNEC (LNEC, 1970). Salienta-se que apenas se efetuou a separação detalhada do material de dimensões granulométricas superiores a 0,074 mm de diâmetro, nomeadamente pelo processo de peneiração. A partir dos ensaios dos limites de Atterberg realizados segundo a norma portuguesa NP-143 (LNEC, 1969) os solos deram não plásticos, orientando para que o material de fração inferior a 0,074 mm seja essencialmente siltoso.

Relativamente às análises granulométricas por peneiração húmida, o procedimento baseou-se em fazer passar cada amostra por uma série de peneiros de malha quadrada normalizada. São expostos na figura 2.14 os peneiros utilizados, sendo que as malhas, por ordem decrescente, apresentavam as seguintes aberturas: 9,51 mm; 4,76 mm; 2,00 mm; 0,841 mm; 0,420 mm; 0,250 mm; 0,105 mm e 0,074 mm.



Figura 2.14 - Fotografia dos peneiros empregues para a realização das análises granulométricas.

Desta forma, as frações sólidas de dimensões granulométricas superiores a 0,074 mm de diâmetro foram assim retidas quando apresentavam dimensões inferiores à malha do peneiro. Na primeira fotografia da figura 2.15 pode observar-se o processo de peneiração efetuado para uma amostra de solo. Por sua vez, na segunda imagem, verifica-se a distribuição das frações sólidas retidas nos peneiros correspondentes.



Figura 2.15 - Fotografias relativas ao processo de peneiração efetuado para uma das amostras em estudo e da distribuição do material obtido nos alusivos peneiros.

Após a realização da peneiração de cada amostra de solo e da obtenção das respetivas frações sólidas, estas foram coladas numa estufa a 80°C para remover o conteúdo de água resultante do processo de peneiração.

De acordo com a massa do material retido nos alusivos peneiros e da massa das respetivas cápsulas, conhecida já inicialmente, determinou-se o valor percentual de cada fração face a massa total da amostra correspondente. Os resultados obtidos para várias amostras estudadas encontram-se apresentadas no gráfico da figura 2.16, visualizando-se as respetivas curvas granulométricas.

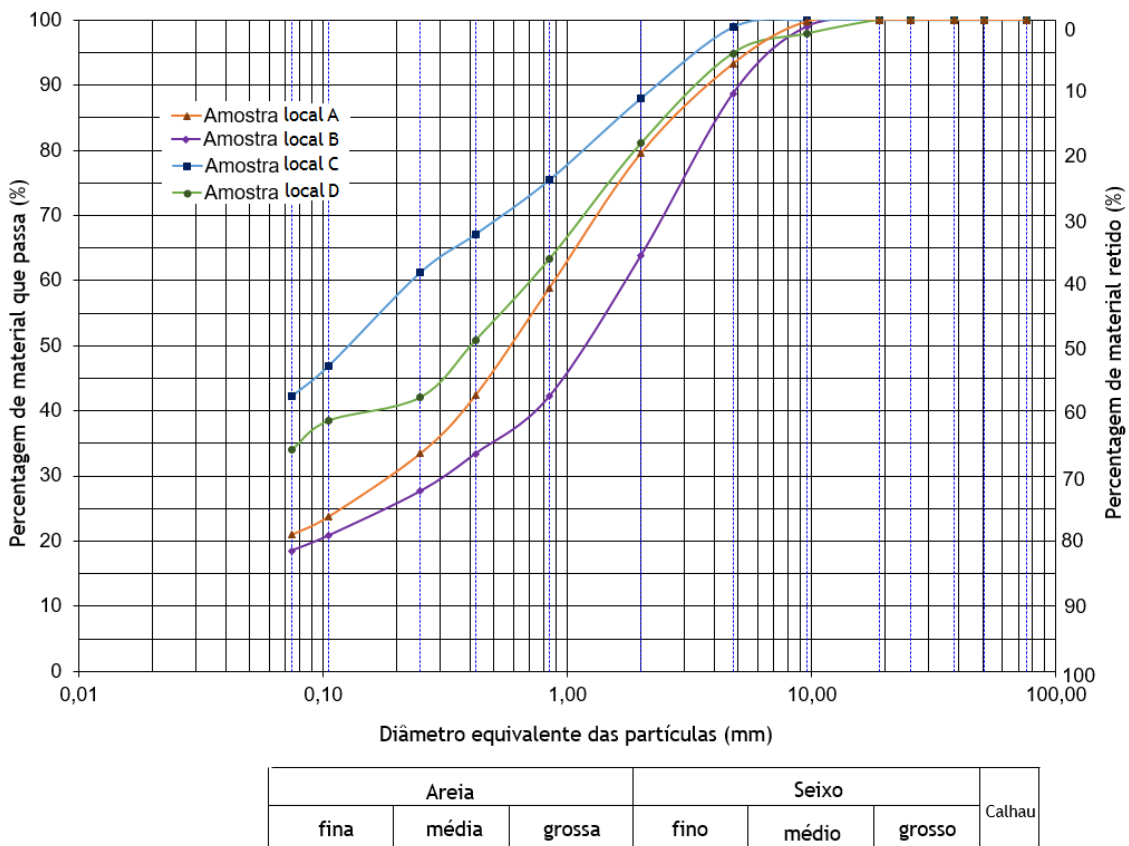


Figura 2.16 - Curvas granulométricas representativas das quatro amostras.

Observando o gráfico pode verificar-se que as quatro amostras são essencialmente constituídas por areias e areias siltosas. A amostra da localização A apresenta uma constituição com aproximadamente 20% de seixo, 59% de areia e 21% de silte/argila, tendo em conta a superioridade da composição de silte como referido anteriormente. Já para a amostra da localização B, a composição obtida aproxima-se de 36% de seixo, 45% de areia e 19% de silte/argila. Relativamente à amostra da localização C, a composição obtida aproxima-se de 12% de seixo, 46% de areia e 42% de silte/argila. Por sua vez, a amostra da localização D apresenta uma constituição de 19% de seixo, 47% de areia e 34% de silte/argila.

Dado não se conhecer de forma separada as percentagens de argila e silte, não se recorreu ao triângulo de Feret, como apresentado na figura 2.2, tendo sido assim efetuada a caracterização dos solos segundo a Classificação Unificada (ASTM D 2487-85). Com base nesta, todas as amostras de solos foram consideradas como areias siltosas.

2.6. Nota conclusiva

No capítulo que agora se termina abordou-se o solo enquanto fonte térmica. Foram apresentados os mecanismos de transmissão de calor mais comuns nos solos, tendo sido analisado de que forma estes podem ocorrer. Posteriormente foram abordadas as suas propriedades térmicas, em que foram apresentados quais os fatores e como estes podem influenciar o seu valor. Abordaram-se, ainda, os ciclos que enquadram o regime térmico do solo, tendo sido apresentados os principais fatores que regem estes fenómenos e algumas estratégias que permitem modificá-los. Na parte final deste capítulo foram expostos os resultados obtidos de quatro análises granulométricas realizadas para a caracterização das amostras de solo recolhidas no âmbito do presente trabalho, em que os resultados obtidos demonstraram que todos os solos integram uma composição semelhante, areia siltosa.

O próximo capítulo será dedicado ao aproveitamento da energia térmica do solo, sendo apresentados os vários tipos de exploração que integram este meio e as aplicações associadas. O capítulo é posteriormente particularizado para uma das suas vertentes explorativas, nomeadamente a energia geotérmica de muito baixa entalpia, onde é abordado detalhadamente o seu aproveitamento como estratégia de climatização através do uso de permutadores de calor ar-solo.

Capítulo 3

3. Arrefecimento e aquecimento pelo solo

Perante o panorama do aumento do consumo de energia direcionado para a climatização de edifícios e do seu impacto sobre o meio ambiente, provocado pela sua produção por fontes de energia fósseis, tornou-se imperativo encontrar estratégias alternativas, eficientes e limpas, que possam proporcionar uma maior poupança energética.

À vista disso, diversas soluções para arrefecimento e aquecimento ambiente têm vindo a ser desenvolvidas contemplando o uso de fonte renováveis, com o intuito de reduzir o consumo de energia necessário para esse fim e contribuir para uma maior sustentabilidade não só energética, mas também ambiental. No leque de energias renováveis, a energia solar, biomassa e a energia geotérmica integram o ramo das fontes alternativas que possibilitam serem utilizadas diretamente para aquecimento e arrefecimento.

A energia geotérmica tem vindo a manifestar, neste domínio e não só, uma alternativa de peso à utilização de fontes de energias convencionais, apresentando ainda, algumas vantagens que a distinguem das outras energias renováveis referenciadas anteriormente. A título de exemplo, este recurso, a partir de uma certa profundidade, não se encontra dependente das condições exteriores e da época do ano, contrariamente à energia solar. Por outro lado, não necessita de recorrer aos processos tradicionais de produção de calor, como é o caso da energia da biomassa que utiliza o calor libertado do processo de combustão, necessitando apenas explorar a energia térmica armazenada no subsolo profundo ou nas suas camadas mais superficiais.

O aproveitamento da energia geotérmica “superficial” tem sido alvo de forte interesse nos últimos anos, na medida que este recurso se apresenta acessível a todos. A utilização de permutadores de calor no aproveitamento desta energia tem-se destacado como uma estratégia com grande potencial na mitigação do consumo de energia direcionado para a climatização de espaços, desempenhando, ainda, um papel contributivo na atenuação da utilização de sistemas convencionais empregues para esse fim.

Neste capítulo é abordada a temática do solo como meio de arrefecimento ou de aquecimento. Inicialmente é abordada a energia geotérmica em todas as suas vertentes, sendo abordados os possíveis modos de exploração e aplicações associadas. O capítulo particulariza-se posteriormente na utilização do solo a muito baixa profundidade, sendo apresentadas as suas diferentes formas de aproveitamento. É dado ênfase à sua exploração através de permutadores de calor ar-solo, sendo abordado o seu princípio de funcionamento e as diversas configurações que podem ser adotadas. São analisados os parâmetros e fatores mais importantes que influenciam o seu desempenho, assim como as vantagens e desvantagens da sua utilização.

Procede-se também à apresentação das expressões matemáticas referentes ao cálculo da potência térmica e do Coeficiente de Desempenho (*COP*) destes sistemas. Por fim, são expostos alguns casos aplicativos destes sistemas em solo português.

3.1. Energia geotérmica

De acordo com o *European Geothermal Energy Council* (EGEC, 2006), a energia geotérmica é definida como “*energia armazenada sob a forma de calor abaixo da superfície terrestre*”. O calor geotérmico advém, para o subsolo profundo, do interior do nosso planeta, oriundo da dissipação do calor remanescente da formação da Terra e, em algumas situações, da energia libertada pela desintegração de elementos radioativos, tais como o urânio, tório e o potássio. Para as camadas mais superficiais do solo, o Sol revela-se a fonte responsável pela renovação do calor aí armazenado.

Salienta-se que, nos dias de hoje, algumas entidades ainda considerem, em contexto legislativo, exclusivamente o aproveitamento deste recurso associado à exploração da energia térmica contida num fluido (água ou vapor de água). Em Portugal, a legislação que enquadra este domínio, nomeadamente pelos Decretos-Lei n.º 87/90 e 90/90, ambos de 16 de março de 1990, define os recursos geotérmicos como “*os fluidos e as formações geológicas do subsolo, de temperatura elevada, cujo calor seja suscetível de aproveitamento*”. No entanto, têm sido efetuados vários esforços no sentido de remodelar este conceito, considerando como recurso geotérmico, para além dos referidos acima, o calor armazenado nas camadas mais superficiais do subsolo, sendo o Sol responsável pela sua renovação. À vista disso, foi assim fundada, em 21 de janeiro de 2013, a Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial (PPGS), composta pela Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Agência de Energia (ADENE) e a Associação Portuguesa de Geólogos (APG), com o intuito de dar a conhecer esta outra visão da exploração do solo em Portugal. Esta plataforma surgiu também no sentido de intervir na investigação e na qualificação de técnicos direcionados nesta área, bem como na aplicabilidade de um novo quadro regulamentar, tendo como suporte a regulamentação já existentes em outros países a nível europeu, como é o caso da Suécia, Suíça, França e da Alemanha (norma VDI 4640), com o objetivo de intervir na sua correta exploração (Ramalho et al., 2014).

Tendo em consideração os potenciais domínios aplicativos da energia geotérmica, os recursos geotérmicos encontram-se geralmente hierarquizados em função da temperatura a que estem se encontram na zona de captação, muitas vezes recorrendo à nomenclatura de entalpia. Na literatura, várias classificações têm sido apresentadas por diversos autores ao longo dos anos. De acordo com a tabela 3.1, apresentam-se algumas das mais recorrentes.

Tabela 3.1 - Classificação dos recursos geotérmicos de acordo com a temperatura do fluido segundo vários autores, referências a) a e) *in* Rocha (2011).

Classificação	a) Muffer & Cataldi (1978)	b) Hochstein (1990)	c) Benderitter & Cormv (1990)	d) Nicholson (1993)	e) Axelsson & Gunnlaugsson (2000)	f) Albuquerque (2013)
Alta Entalpia	> 150 °C	> 225 °C	> 200 °C	> 150 °C	> 190 °C	> 100 °C
Entalpia Intermédia	90 - 150 °C	125 - 225 °C	100 - 200 °C	-	-	-
Baixa Entalpia	< 90 °C	< 125 °C	< 100 °C	≤ 150 °C	≤ 190 °C	20 - 100 °C
Muito Baixa Entalpia	-	-	-	-	-	< 20 °C

Para o presente estudo considerou-se a classificação de Albuquerque (2013), em que os aproveitamentos geotérmicos encontram-se divididos em três categorias de entalpia, muito baixa, baixa e alta. Esta classificação enquadra-se ao atual cenário do aproveitamento da energia geotérmica, tendo acompanhado a evolução das tecnologias direcionadas neste âmbito, e outras perspetivas de utilização do solo, nomeadamente das suas camadas mais superficiais como fonte de arrefecimento em período de verão, e como fonte de aquecimento na época de inverno. É neste domínio que se insere a energia geotérmica de muito baixa entalpia.

Embora este tipo de aproveitamento geotérmico represente o tema central da presente dissertação, são abordados nas subseções que se seguem todas as categorias consideradas segundo a classificação do autor escolhido.

3.1.1. Energia geotérmica de alta entalpia

A exploração da energia geotérmica de alta entalpia encontra-se intimamente ligada à produção de energia elétrica, recorrendo integralmente ao calor proveniente de zonas muito profundas da crosta terrestre. As estratégias mais correntes utilizam o fluido hidrotermal explorado através da perfuração de poços concêntricos, podendo estes alcançar 5 km de profundidade, de modo a atingir os respetivos reservatórios geotérmicos (Lopes, 2014).

Embora neste domínio de alta entalpia, os recursos geotérmicos, segundo Albuquerque (2013), apresentem temperaturas superiores a 100 °C, estes podem apresentar-se sob a forma de vapor de água ou numa mistura de vapor de água e água muito quente. Relativamente à pressão abaixo da superfície, a água pode existir no estado líquido a temperaturas muito mais elevadas, podendo apenas mudar de fase mediante a diminuição da sua pressão em virtude da sua ascensão à superfície (Banks, 2008).

A produção de energia elétrica pode ser realizada através de diversas tecnologias de conversão, sendo as centrais geotérmica de vapor seco, as de vapor “flash” e as de ciclo binário as mais empregues. A escolha destas dependerá das características do fluido geotérmico (Costa, 2012).

O aproveitamento da energia geotérmica de alta entalpia pode ser encontrado em Portugal, no Arquipélago dos Açores, nomeadamente na ilha de São Miguel, dada as suas condições geológico-tectónicas. A ilha envolve duas centrais localizadas no Campo Geotérmico da Ribeira Grande, nomeadamente a Central Geotérmica do Pico Vermelho e a Central Geotérmica da Ribeira Grande, as quais apresentam uma potência instalada conjunta de 23 MW. Ambas as centrais integram um sistema binário, envolvendo um *Ciclo de Rankine*, utilizando como fluido secundário n-pentano. Os fluidos geotérmicos captados, predominantemente em estado líquido, cujo valor máximo de temperatura, referente à média das duas centrais, é de 237,5°C, sendo que as zonas de captação com maior potencial apresentarem-se entre os 500 e 1200 metros de profundidade (Bicudo, 2012 *in* Costa, 2012). Segundo o relatório publicado pela EDA (2015), as centrais permitiram produzir em 2015 um total 182 GWh de energia elétrica, representando 67,9% do total de energia elétrica produzida por fontes de origem renovável, e 23,6% do valor total produzido por ambas as fontes convencionais e alternativas na Região Autónoma dos Açores. É de forma clara que o aproveitamento deste recurso representa um fator importante, nomeadamente socioeconómico, para a Região Autónoma dos Açores, permitindo mitigar a sua dependência dos recursos energéticos adquiridos do exterior.

Nestes últimos anos tem-se vindo a assistir a progressos notórios na otimização das tecnologias direcionadas ao aproveitamento dos recursos geotérmicos de alta entalpia. Olhando para a tabela anterior, em que temperatura mínima para a produção de energia elétrica estava limitada para valores superiores a 150°C, hoje em dia, através dos sistemas ORC (*Organic Rankine Cycle*) é possível produzir-se energia eléctrica para fluidos com temperaturas rondando os 100°C (Albuquerque, 2011).

Os aproveitamentos geotérmicos neste domínio não se encontram apenas restringidos a reservatórios hidrotermais. Os Sistemas Geotérmicos Estimulados (*Enhanced Geothermal Systems ou Engineered Geothermal Systems - EGS*), designados outrora de sistemas HDR (*Hot Dry Rock*) representam outra estratégia baseando-se na extração de calor de maciços rochosos quentes localizados a profundidades elevadas, geralmente entre os 4000 e os 6000 metros (Neves et al., 2011). Segundo estes autores, uma vez que esses locais são descritos como altamente impermeáveis e pelo facto da ocorrência de fluidos hidrotermais ser reduzida, os aproveitamentos geotérmicos são obtidos pela criação de reservatórios geotérmicos artificiais. Estes reservatórios são, assim, produzidos pela injeção de água a alta pressão no maciço, processo esse designado de fracturação hidráulica (Banks, 2008). Ao inserir água fria na rocha fraturada, através do furo de injeção, o fluido sofrerá um aumento de temperatura devido à sua circulação pelas fraturas existentes, sendo em seguida recolhido, através de um ou mais furos de recuperação, para ser empregue para produzir energia elétrica. De acordo com Rocha

(2011), é possível através destes sistemas produzir energia elétrica perante temperaturas do fluido inferiores a 150 °C.

3.1.2. Energia geotérmica de baixa entalpia

A energia geotérmica de baixa entalpia é convencionalmente associada ao aproveitamento direto do calor geotérmico concedido pela captação de águas, naturalmente quentes, de origem geotérmica. A sua aplicação em balneoterapia, ou seja, para fins medicinais, representa o clássico do aproveitamento deste tipo de energia, sendo que à mercê dos avanços tecnológicos e dos conhecimentos alcançados neste domínio, levou a que a utilização deste calor pudesse surgir em outros domínios de aplicação. Hoje em dia, o aproveitamento deste recurso encontra-se associado a diversas aplicações como aquacultura, horticultura, produção de águas quentes sanitárias, aquecimento urbanos (*district heating*), bombas de calor geotérmicas, entre outras (Banks, 2008).

Segundo Lourenço & Cruz (2006), o tipo de aplicação encontra-se subjacente a determinados parâmetros deste recurso geotérmico, nomeadamente a sua temperatura, caudal disponível, assim como, das suas propriedades, em particular do seu grau de salinidade. Caso o fluido apresente elevado teor de salinidade, inviabilizará o seu uso direto em consequência dos efeitos corrosivos subsequentes.

Apresentam-se na figura 3.1 as ocorrências termais em Portugal Continental, onde se observa que estas não superam valores de temperatura de 80 °C. Denota-se, ainda, que estes valores predominam, com 78%, numa gama de temperatura entre 20 e 40 °C (Lourenço & Cruz, 2006).

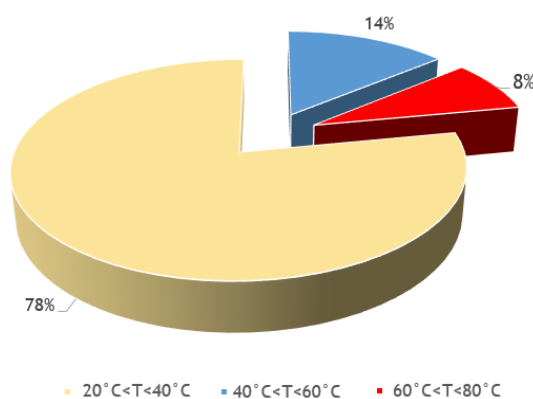


Figura 3.1 - Repartição das temperaturas das ocorrências termais em Portugal Continental. Adaptado de Lourenço & Cruz (2006).

Registam-se em Portugal algumas aplicações deste recurso geotérmico de baixa entalpia. Para além da sua utilização no termalismo em balneoterapia, nas Caldas de Chaves as águas de origem geotérmica captadas com cerca de 73 °C são também utilizadas, através do recurso a um permutador de calor, para o aquecimento ambiente e produção de água quente sanitária para diversas infraestruturas. Destaca-se nesse sentido, a sua utilização para o Hotel Aqua

Flaviae, Hotel Jaime, piscina municipal e para o balneário termal. Em São Pedro do Sul, este recurso geotérmico encontra-se também empregue para o aquecimento ambiente, também por intermédio de permutadores de calor, para os balneários da Rainha D. Amélia e D. Afonso Henriques, e, duas unidades hoteleiras (Hotel do Parque e Hotel Vila do Banho), as quais estas últimas usufruam esta água naturalmente quente ainda na produção de água quente sanitária. Na zona do Vau, ainda em S. Pedro do Sul, a água de origem subterrânea, captada a 67 °C, é diretamente utilizada para o aquecimento de estufas para a produção de frutos tropicais (DGE, 2016).

3.1.3. Energia geotérmica de muito baixa entalpia

A necessidade emergente do desenvolvimento de tecnologias com base em energias alternativas e eficientes, e os progressos realizados no domínio da energia geotérmica, tanto a nível tecnológico como de conhecimento, motivaram outra visão da sua exploração, nomeadamente para zonas mais superficiais da crosta terrestre.

A exploração da energia geotérmica de muito baixa entalpia consiste no aproveitamento do calor armazenado nas camadas mais superficiais do solo. Como vimos no gráfico da figura 2.10, apresentado no capítulo 2.4 da presente dissertação, o solo, mesmo a muito baixas profundidades, tende em consequência da sua inércia térmica a apresentar valores de temperatura superiores à temperatura do ar exterior durante os meses mais frios, e inferiores nos meses mais quentes. Em virtude deste fenómeno, o solo permite ser explorado como dissipador de calor ou como fonte de calor, de acordo com os alusivos períodos sazonais.

Esta outra forma de exploração da energia geotérmica permitiu superar algumas limitações da sua tradicional utilização, principalmente na necessidade de recorrer a zonas que apresentam condições geológicas favoráveis para que o aproveitamento seja praticável. Ao contrário desta, a energia geotérmica de muito baixa entalpia encontra-se disponível em qualquer parte do mundo (Ramalho et al., 2014).

Segundo Lopes (2014) pode-se distinguir dois tipos de zonas na energia geotérmica de muito baixa entalpia, a zona heterotérmica e a zona homotérmica. Como vimos no capítulo 2, a temperatura do solo nas suas camadas mais próximas da superfície tende a alterar-se em resposta às alterações meteorológicas, nomeadamente das flutuações diárias e sazonais da temperatura exterior, e da radiação solar incidente sobre a sua superfície, fatores este que obviamente variam de local para local. É nesta região que se enquadra a zona heterotérmica.

Na figura 3.2 é esquematizado o perfil da temperatura do solo mediante o avanço em profundidade. Visualiza-se que a temperatura do solo nesta região é determinada pela radiação solar incidente na sua superfície durante o período diurno, pelo calor perdido por radiação para a atmosfera durante o período noturno, pelas trocas de calor por convecção e

evapotranspiração com o ar exterior, e, como componente minoritária, pelo fluxo de calor geotérmico oriundo do interior da Terra para a superfície.

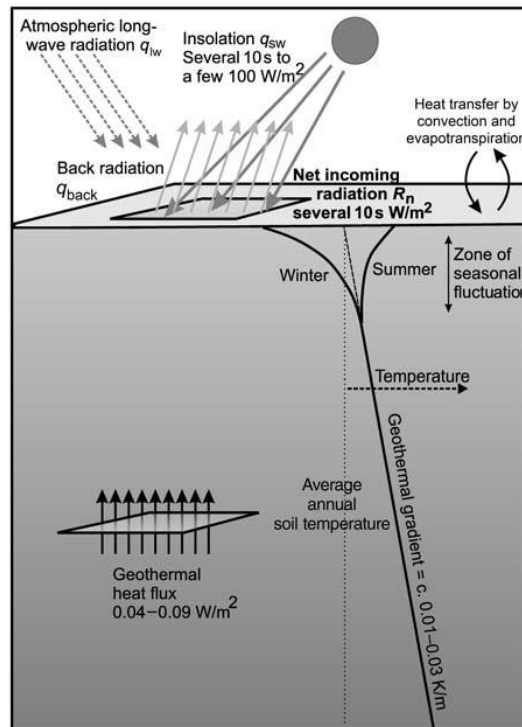


Figura 3.2 - Esquema relativo ao perfil da temperatura do solo mediante o efeito das variações sazonais das condições meteorológicas e do fluxo de calor geotérmico (Banks, 2008).

Segundo Farouki (1981), as variações diárias da temperatura exterior, em geral, não tendem a penetrar mais do que 30 a 80 cm abaixo do nível do solo. Porém, as flutuações sazonais podem exercer influência sobre a temperatura do solo até, tipicamente, 10 metros de profundidade, embora estes valores dependam das propriedades físicas e térmicas do solo em questão.

A partir dessa profundidade a temperatura do solo tende a permanecer aproximadamente constante ao longo do ano. Esta temperatura é designada de temperatura do solo não perturbado, na medida em que os efeitos das flutuações sazonais de temperatura são praticamente desprezados, representando a zona homotérmica (Lopes, 2014). O valor desta temperatura é, em geral, aproximadamente equivalente à temperatura média anual do ar exterior da região a que lhe respeita (Khabbaz et al., 2016). Segundo Brandl (2006), em grande parte da Europa a temperatura do solo apresenta valores aproximadamente constantes a profundidades compreendidas entre 10 e 15 m.

Como pode observar-se adicionalmente na figura 3.2, a temperatura do solo nesta região do subsolo tende a aumentar com a profundidade devido ao calor proveniente do interior da Terra. Este aumento de temperatura denomina-se de gradiente geotérmico, sendo que a gama de valores associado a esse incremento varia de região para região dada a heterogeneidade da crosta terrestre. À exceção das áreas de atividade vulcânica ou outras zonas anómalas, em que

o gradiente geotérmico tende em ser superior, a temperatura do solo aumenta geralmente numa gama entre 1 - 3°C por cada 100 metros (Banks, 2008).

3.2. Arrefecimento e aquecimento pelo solo

Os aproveitamentos geotérmicos de muito baixa entalpia já são bem conhecidos desde dos tempos antigos. O seu primeiro interesse remonta a mais de 5000 anos atrás quando algumas civilizações arquitetaram aldeias subterrâneas, como é o exemplo da província de Henan em Shanxi, a aldeia de Matmata na Tunísia e o Vale de Goreme na Turquia (Staniec & Nowak, 2011).

Estas estruturas subterrâneas tinham como finalidade garantir segurança aos moradores face aos ataques de animais, como também de proporcionar um ambiente térmico estável, visto a maior parte destas construções localizarem-se em zonas quentes e áridas, envolvendo grandes flutuações diurnas e sazonais de temperatura exterior. Este facto revela que a energia geotérmica de muito baixa profundidade foi primitivamente empregue como fonte de arrefecimento, ou seja, usando o solo como um dissipador de calor (Alkaff et al., 2016).

Outra perspetiva da utilização do solo recorre à circulação do ar, seja ele proveniente do ambiente externo ou do local desejado a aquecer ou arrefecer. Esta estratégia faz recurso a uma ou várias condutas enterradas no solo a uma profundidade suficiente de forma a facultar temperaturas inferiores ou superiores, de acordo com a época do ano, à temperatura do ar verificada no exterior. Esta estratégia de climatização já é comum desde há muitos séculos atrás, em particular em edifícios do Médio Oriente, onde o solo era explorado através de canais subterrâneos conjuntamente com torres de vento, com o objetivo de promover a ventilação natural como técnica de arrefecimento passivo dos edifícios (Khabbaz et al., 2016).

Desde no final dos anos 70 e início dos anos 80 do século XX, esta estratégia de exploração da energia geotérmica de muito baixa profundidade, designada nos dias de hoje de permutadores de calor ar-solo, voltou a receber interesse como técnica de arrefecimento e aquecimento de espaços, tanto nos países em desenvolvimento como nos países desenvolvidos (Soni et al., 2016). No entanto, a sua aceitação não foi imediata devido a diversos problemas, sendo os principais a acumulação de água no interior das tubagens, a má qualidade do ar (crescimento de micro-organismos no interior dos tubos), entre outros problemas associados à falta de desempenho conseguidos por estes (Hollmuller & Lachal, 2001).

Dado ao cenário energético atual, dos acordos para a sua utilização de forma racional e da pressão para um uso mais acentuado de tecnologias eficientes e “amigas do ambiente”, inúmeros estudos vieram ser realizados no domínio dos permutadores de calor ar-solo, a fim de superar as barreiras iniciais da sua utilização. Mediante a quantidade e a qualidade dos conhecimentos e informações disponíveis acerca desta estratégia de climatização, os permutadores de calor ar-solo são, nos dias de hoje, relatados como uma tecnologia com potencial significativo para mitigação do consumo de energia direcionado para esse fim.

Contudo, o aproveitamento do calor armazenado no subsolo com a finalidade de satisfazer as necessidades de aquecimento ou de arrefecimento de espaços, pode ser também efetuado por outras tecnologias, como por exemplo, através de bombas de calor geotérmicas. Estes sistemas integram no seu processo de captação ou dissipação de calor, geralmente, permutadores de calor água-solo que, como o nome indica, envolvem como fluido de trabalho no seu circuito de permuta de calor, água. Segundo Benhammou et al. (2015), a empregabilidade destes sistemas é recomendada para solos que não conseguem proporcionar directamente as temperaturas para satisfazer as exigências requeridas de climatização.

Em suma, podemos constatar que persistem duas formas que possibilitam tirar proveito da energia geotérmica de muito baixa profundidade. Uma delas consiste em promover o contacto direto da envolvente do edifício com o solo, podendo ainda este ser dividido em dois tipos de estratégias, como podemos observar nos esquemas ilustrativos da figura 3.3. O contacto parcial do edifício com o solo representa uma das estratégias, exemplificada na figura 3.3 a), no interior do edifício encontra-se ligado ao solo por condução através de algumas paredes, pavimento ou, eventualmente, a cobertura do edifício. Geralmente, a única fachada do edifício exposta às condições ambientais exteriores encontra-se orientada a Sul (para o hemisfério Norte), com o intuito de promover os ganhos solares durante o período diurno nos meses mais frios do ano (Staniec & Nowak, 2011).

Outra possibilidade consiste em promover o contacto direto do solo com toda a envolvente do edifício, ilustrado na figura 3.3 b). Esta estratégia confere ao edifício proteção contra a incidência direta da radiação solar e uma significativa massa térmica, tornando-se menos propenso às oscilações de temperatura no seu interior (Givoni, 2007). É de salientar que neste caso algumas soluções, nomeadamente construtivas, devem ser aplicadas a fim de mitigar as consequências psicológicas e fisiológicas associadas à utilização desta técnica. Segundo Dronkelaar et al. (2013), a ausência de janelas, átrios ou outro tipo de elemento que permita realizar o contacto do edifício com o ambiente exterior, poderá induzir a sensação de claustrofobia, desorientação temporal (dia/noite), falta de estimulação das variações das condições climáticas e da luz natural, causando por vezes a inaceitabilidade pública desta estratégia.

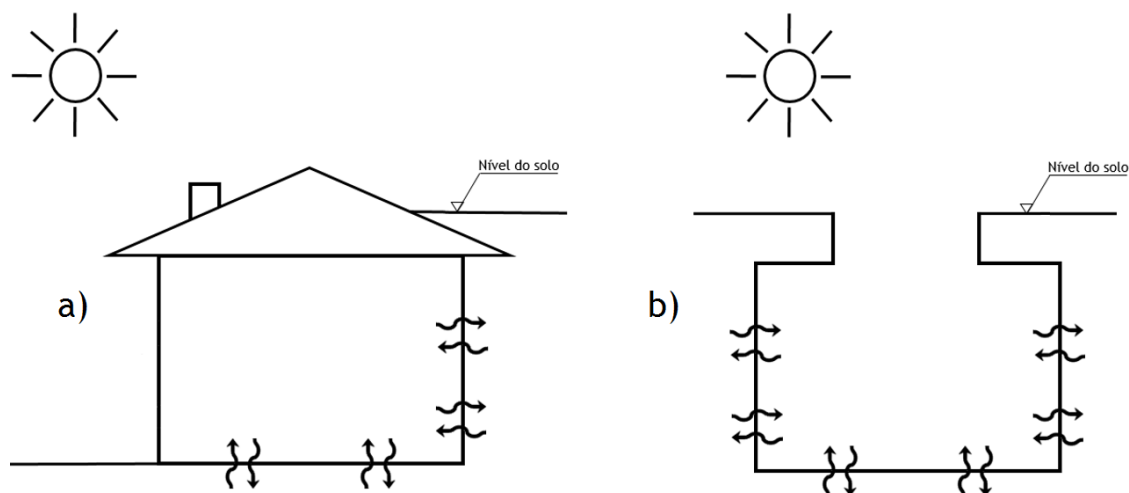


Figura 3.3 - Arrefecimento/aquecimento pelo solo por contacto direto a) parcial e b) integral.

Em alternativa, existe a utilização do solo como fonte ou dissipador de calor através da utilização de permutadores de calor ar-solo, sendo esta técnica designada de arrefecimento/aquecimento pelo solo por contacto indireto. Segundo Soni et al. (2016) esta estratégia tem sido preferida para climas propensos a oscilações elevadas de temperatura do ar exterior. O seu princípio de funcionamento será pormenorizadamente discutido na secção que se segue, o qual retrata o tema central da presente dissertação.

A análise da literatura deixa perceber que são diversas as aplicações que estes sistemas podem integrar, envolvendo como estratégia de climatização de edifícios, estufas agrícolas, equipamentos eletrónicos (armários de telecomunicação), processos industriais, entre outras aplicações.

Por outro lado, os permutadores de calor ar-solo têm vindo a revelar outra possibilidade da sua utilização, nomeadamente através da sua combinação com outras tecnologias, sejam elas passivas ou ativas, e que tenham a mesma ou diferentes finalidades. Segundo Soni et al. (2016), esta combinação, denominada de sistemas híbridos, tem como objetivo ultrapassar as limitações de ambas as estratégias empregues e, por sua vez, incrementar o desempenho destas. Um esquema exemplificativo é demonstrado na figura 3.4; porém, é de elucidar que a associação das outras tecnologias ao permutador de calor ar-solo pode ser efetuada na sua zona de admissão de ar ou à sua saída, caso o propósito seja incrementar o potencial de arrefecimento ou aquecimento do ar. Para além dos benefícios térmicos, esta estratégia desempenha um papel relevante na conservação de energia e, conseqüentemente, na mitigação do seu impacto sobre o ecossistema, através da redução das emissões de gases poluentes.

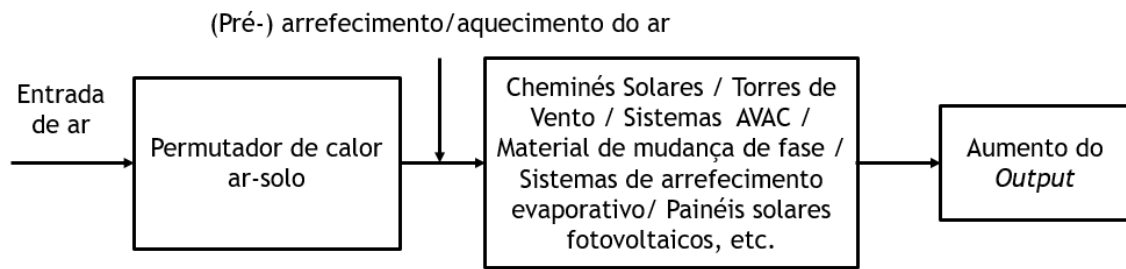


Figura 3.4 - Conceito de sistemas híbridos. Adaptado de Soni et al. (2016).

A escolha adequada das tecnologias a serem associadas ao sistema permutador de calor ar-solo, deve envolver uma análise de diversos fatores, como por exemplo, a finalidade e aplicação em causa, os custos associados à sua inserção (viabilidade económica), a eficiência conseguida pela combinação das tecnologias e as condições meteorológicas do local (Soni et al., 2016).

3.2.1. Princípio de funcionamento e tipos de configuração dos permutadores de calor ar-solo

Os permutadores de calor ar-solo consistem num sistema capaz de utilizar o subsolo como fonte ou sumidouro de calor. Em virtude da sua elevada inércia térmica, o solo, mesmo nas suas camadas menos profundas, mostra-se como um ambiente térmico aproximadamente estável ao longo do ano, como tem sido referido anteriormente, exibindo temperaturas mais baixas em período de Verão e mais altas no Inverno comparativamente à temperatura do ar exterior. Para fornecer ambos os efeitos, os permutadores de calor ar-solo, ou ainda, segundo a terminologia inglesa, os *Earth to Air Heat Exchanger* (EAHE) utilizam uma ou várias tubagens com comprimentos, de acordo com a literatura, na ordem dos 20 m a 70 m, e, usualmente enterradas entre 2,5 e 3 metros (Khabbaz et al., 2016 e Manjul & Bartaria, 2016). Uma das extremidades do sistema funciona como entrada de ar, enquanto a outra extremidade, referente a saída, liberta o ar para o local desejado a climatizar. Na maioria dos casos faz-se recurso a uma unidade de ventilação mecânica para insuflar o ar exterior para o interior da tubagem, de forma a garantir um caudal de ar constante e mais elevado face ao conseguido por ventilação natural.

Posto isso, o ar ao ser inserido para o interior do tubo irá percorrer o circuito de permuta de calor projetado, ocorrendo uma transferência de calor por convecção entre a superfície do tubo e o ar, em movimento no seu interior. Por outro lado, dado a tubagem encontrar-se em contacto com o meio ambiente subterrâneo, a sua superfície apresenta uma temperatura idêntica ou quase idêntica à temperatura do solo adjacente, porém, geralmente dissemelhante da temperatura do ar inserida no permutador de calor ar-solo. À vista disso, uma troca de calor ocorrerá para ou a partir do solo circundante por condução. Consequentemente, a temperatura do ar irá gradualmente aumentar ou decair, consoante a época do ano, ao longo do permutador de calor ar-solo.

À vista disso, esta estratégia tem atraído bastante interesse em diversos setores de aplicação, visto representar uma solução com elevado potencial de conservação de energia e, ao mesmo tempo, ter a capacidade de facultar tanto o efeito de aquecimento como de arrefecimento. De acordo com o alusivo período sazonal, prevalecendo-se, assim, a utilização de outros sistemas passivos no sentido de alguns deles proporcionarem somente um dos efeitos referidos.

Desde o seu mais recente interesse, diversas configurações de permutadores de calor ar-solo têm vindo a ser desenvolvidas. Contudo, de uma forma genérica, estas podem ser agrupadas em dois tipos de circuito (Manjul & Bartaria, 2016), sendo eles:

- Sistemas de circuito fechado;
- Sistemas de circuito aberto.

Relativamente aos permutadores de calor de circuito fechado, exemplificados na figura 3.5, estes encontram-se totalmente enterrados no solo, sendo que o ar que nele é percorrido advém do espaço que se pretende climatizar. Esta configuração permite a recirculação do ar, sendo espectável que os sistemas de circuito fechado sejam mais eficientes que os sistemas em circuito aberto, visto o ar indiciar, em geral, uma temperatura mais próxima da desejada para satisfazer as condições de conforto solicitadas dado encontra-se somente em convivência com o permutador e o local solicitado a aquecer ou arrefecer (Do et al., 2015).

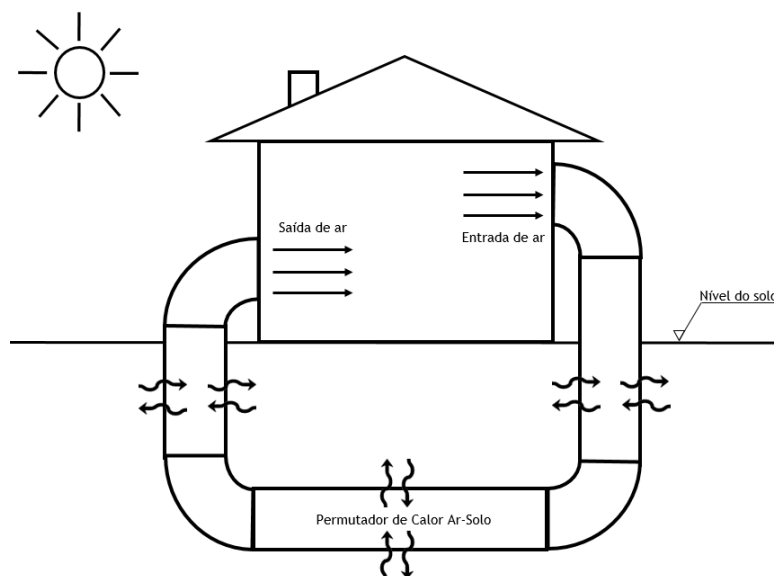


Figura 3.5 - Esquema ilustrativo de um permutador de calor ar-solo em circuito fechado.

Porém, dada a regulamentação sobre a qualidade do ar interior (QAI) em edifícios de serviço, residências, entre outros, que impõem, por exemplo, valores mínimos da taxa de renovação do ar por hora no seu interior, esta configuração parece ter caído em desuso dado ao facto de não atender aos requisitos exigidos pela legislação (Hollmuller & Lachal, 2001).

Os permutadores de calor ar-solo de circuito fechado podem apresentar diversas configurações, podendo estas sere agrupadas de acordo com a sua disposição no subsolo, nomeadamente na horizontal (figura 3.6) ou na vertical (figura 3.7). A escolha da acomodação do permutador depende fortemente do espaço disponível como também, dos custos que estão associados às perfurações/escavações, que variam com a composição do solo, apresentando claramente uma barreira à implementação de permutadores de calor ar-solo verticais (Florides & Kalogirou, 2007 e Dasare & Saha, 2015).

Embora os sistemas verticais indiciarem-se geralmente mais caros do que os sistemas horizontais, devido essencialmente aos custos associados ao processo de furação, conseguem explorar maiores diferenças de temperaturas entre o subsolo e o ambiente externo. Quanto às configurações horizontais apresentam-se localizadas mais próximas da superfície terrestre, normalmente a um ou dois metros de profundidade. Este tipo de disposição da tubagem encontra-se mais suscetível às perturbações exteriores, nomeadamente às oscilações de temperatura, minimizando, conseqüentemente, a taxa de transferência de calor do permutador com o solo devido à temperatura do solo estar mais próxima da temperatura exterior (Lee et al., 2015).

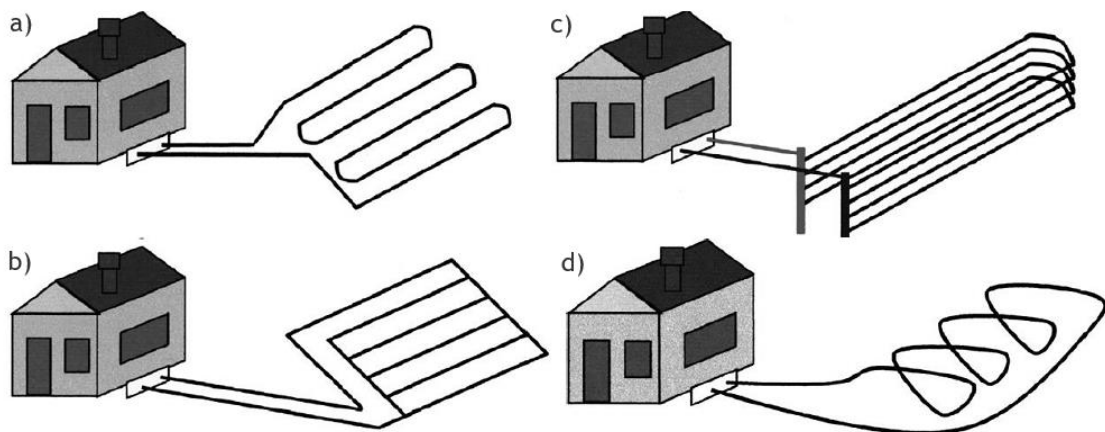


Figura 3.6 - Esquema ilustrativo de permutadores de calor, em circuito fechado, do tipo horizontal: a) em série, b) em andares, c) paralelo, d) espiral. Adaptado de Florides & Kalogirou (2007).

Na generalidade dos casos, para a implementação de permutadores horizontais é necessário deter uma vasta área de terreno. Contudo, algumas configurações têm sido desenvolvidas com o intuito de combater este dilema, nomeadamente através da disposição da tubagem em espiral, exemplificado na figura 3.6 d).

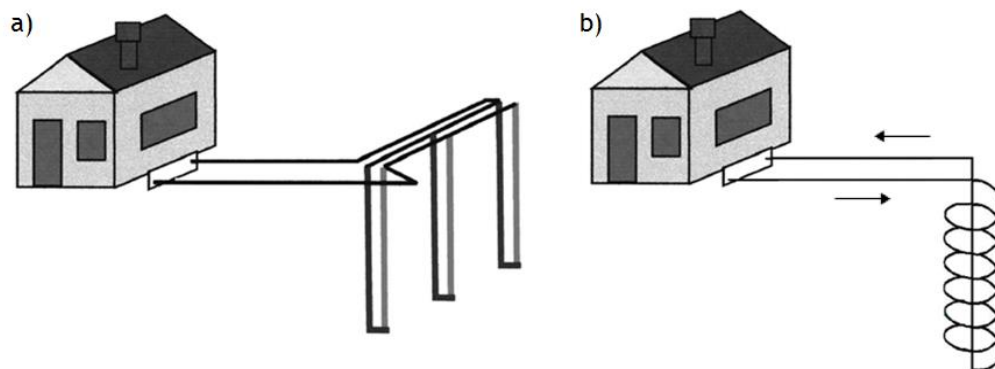


Figura 3.7 - Esquema ilustrativo de permutadores de calor, em circuito fechado, do tipo vertical: a) em “U” e b) helicoidal. Adaptado de Florides & Kalogirou (2007).

Na figura 3.7 b) é possível observar uma outra configuração inovadora nos sistemas do tipo vertical, em que a tubagem expõe um formato helicoidal. Esta estratégia de disposição dos tubos permite proporcionar uma grande área de contacto do permutador com o solo circundante, maximizando, assim, a captação ou a dissipação de calor. Pode observar-se adicionalmente nessa figura que esta configuração apresenta o tudo de retorno orientado na vertical, sendo este facto justificado de forma a reduzir o tempo de transição do ar presente na base para o espaço a climatizar, minimizando assim o “curto-circuito térmico” do sistema (REHAU, 2013). No entanto, esta configuração encontrar na literatura mais direccionada para bombas de calor geotérmicas.

Quanto aos permutadores de calor ar-solo de circuito aberto, exemplificados na figura 3.8, são por sua vez outra configuração possível de adotar para utilizar o subsolo como fonte ou dissipador de energia térmica. Neste caso, o ar é proveniente do ambiente exterior, sendo admitido para o interior da tubagem e conduzido diretamente para o espaço desejado a climatizar.

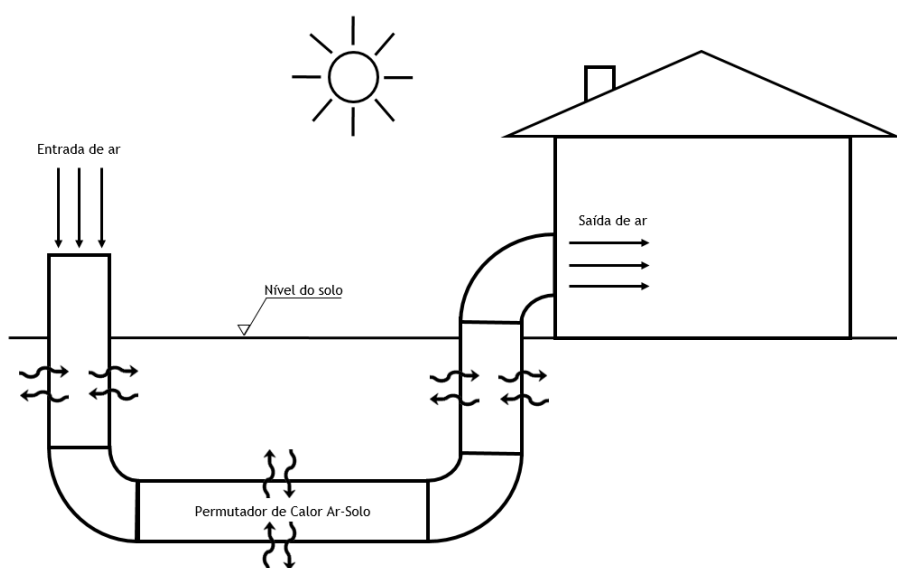


Figura 3.8 - Esquema ilustrativo de um permutador de calor ar-solo em circuito aberto.

Destaca-se que a maioria dos estudos referentes a permutadores de calor ar-solo, realizados nas últimas duas décadas, incidiram em projetos de circuito aberto (Do et al., 2015). Habitualmente os permutadores que envolvem este tipo de configuração encontram-se instalados horizontalmente no subsolo, podendo exibir configurações análogas às apresentadas para os sistemas de circuito fechado. No entanto, não subsiste uma configuração genérica para a qual tendem a maioria das soluções.

Contudo, é de referir que das configurações de permutadores de calor apresentadas anteriormente todas podem operar como estratégia de arrefecimento e aquecimento principal, no entanto, caso o sistema não consiga facultar as necessidades requeridas de climatização, poderá ser integrado no seu circuito um sistema de apoio, seja ele passivo ou ativo, que incremente a sua capacidade de aquecimento e arrefecimento do ar inserido (sistema híbrido).

3.2.2. Parâmetros e fatores influentes no desempenho de permutadores de calor ar-solo

A conceção de tal sistema requer um processo de dimensionamento complexo, que envolve a seleção e otimização de diversos parâmetros que influenciam o seu desempenho. Para além dos parâmetros construtivos, segue-se abaixo um repertório dos principais fatores que possam de alguma forma interferir no desempenho de permutadores de calor ar-solo.

No que concerne ao material da tubagem persiste uma extensa variedade de materiais que podem ser selecionados, sendo que os mais típicos encontrados na literatura vão desde de tubos em aço (inoxidável ou galvanizado), argila, cimento, policloreto de vinilo (PVC), aos tubos polipropileno (PP) com revestimento antimicrobiano. Embora os materiais de elevada condutibilidade térmica facultam uma melhor transferência de calor por condução, alguns investigadores, como Ahmed et al. (2016) e Misra et al. (2014), denotam que neste domínio este fator inflige uma irrelevante influência sobre o desempenho térmico destes sistemas. À vista disso, persiste uma vasta empregabilidade de permutadores de calor em PVC, nomeadamente em estudos experimentais, mesmo proporcionando um desempenho térmico ligeiramente inferior aos alcançados por tubos de maior condutibilidade térmica, a sua escolha justifica-se, em particular, pelo seu baixo custo de aquisição, simplicidade de montagem, resistência e durabilidade (Sousa, 2014).

Quanto ao comprimento da tubagem, torna-se evidente que quanto maior for o circuito de permuta de calor maior será a área da superfície externa da tubagem que entra em contacto com o solo envolvente, considerando um diâmetro fixo. À vista disso, uma maior quantidade de calor será transferida entre o solo e ar albergado no interior da tubagem, permitindo, conseqüentemente, que a temperatura do ar tenda a aproximar-se efetivamente da temperatura do solo envolvente. Contudo, em alguns casos, a empregabilidade de tubos muito compridos pode não ser admissível, seja do ponto de vista económico ou em virtude das restrições associadas ao espaço de terreno.

Relativamente ao diâmetro do tubo, é perceptível que a adoção de um diâmetro mais reduzido permite com que o ar, que circula no circuito de permuta de calor, atinja uma temperatura que se aproxime mais da temperatura do solo circundante, visto que a porção de ar albergado no interior da tubagem, em particular aquela que se encontra mais longínqua, ou seja, no centro do tubo, se encontrar mais próximo do solo envolvente, comparativamente a tubos de diâmetro superior. Nestas circunstâncias, sucederá uma transferência de calor mais eficaz entre o ar, presente no interior do permutador, e o solo.

Embora a adoção de tubos longos com diâmetro reduzido possa proporcionar um incremento no desempenho térmico dos permutadores, estes irão em contrapartida contribuir para o aumento da queda de pressão ao longo do sistema. Segundo De Paepe & Janssens (2003), este problema pode ser atenuado mediante o aumento do número de tubos enterrados, ou seja, repartindo o comprimento inicialmente considerado.

Este facto introduz a questão sobre o espaçamento adequado entre as tubagens enterradas para evitar interferências de transferência de calor. Segundo De Paepe & Willems (2001), *in* Florides & Kalogirou (2007), a distância limite entre tubos adjacentes relativamente às possíveis interferências térmicas entre cada tubo, é igual a duas vezes o diâmetro externo do tubo considerado. Por outro lado, é necessário ter também em ponderação as trocas de calor entre infraestruturas e o solo que as rodeia, podendo estes por sua vez causar igualmente alguma influência na temperatura do solo e, por conseguinte, interferir no desempenho do sistema permutador caso este seja instalado muito próximo.

Relativamente à velocidade do escoamento de ar, este parâmetro dita o tempo que o ar permanece em contacto com a superfície interna da tubagem. Sugere-se na literatura a adoção de velocidades de escoamento reduzidas, com o objetivo de prolongar o período em que o ar se encontra em contacto com o ambiente subterrâneo, proporcionando desta forma, comparativamente a velocidades mais elevadas, uma maior troca de calor entre o ar e o solo envolvente. Por conseguinte, isto irá permitir que a temperatura do ar estabilize a uma temperatura mais próxima da temperatura do solo circundante à tubagem.

No que diz respeito a profundidade dos permutadores, estes devem ser instalados tão fundos quanto possível. Com o aumento da profundidade, as camadas do solo indiciam-se menos propensas as trocas de calor com o ambiente externo e, consequentemente, proporcionem um ambiente térmico mais estável e favorável para o seu aproveitamento como dissipador ou fonte de calor. Porém, os custos associados às perfurações podem envolver custos operacionais elevados e de difícil execução (Ahmed et al., 2016)

O tempo de funcionamento do permutador podem também influenciar o seu desempenho. Mediante o seu ciclo contínuo de trabalho, da prolongada utilização do permutador de calor decorrerá, por consequência, uma alteração mais acentuada da temperatura do solo, e, por sua vez, numa maior saturação térmica do mesmo. Segundo Mathur et al. (2015) este fenómeno

é definido pela convergência do valor da temperatura do solo, nas camadas circundantes à tubagem, ao valor da temperatura exterior. Em consequência deste fenómeno resulta a deterioração do desempenho térmico destes sistemas, dada a diminuição das trocas de calor entre o ar, presente no interior do circuito de permuta de calor, e o solo. Todavia, a recuperação da temperatura do solo pode ser feita através do aumento do espaçamento entre cada tubo, caso a configuração adotada envolva mais de um tubo colocado paralelamente, e pelo aumento do comprimento do permutador. Porém, estas duas estratégias podem ocasionalmente não serem executáveis, devido, por exemplo, à limitação do espaço de terreno, pelos custos extras ou outros aspetos que estejam associados à remodelação do projeto. Por outro lado, Mathur et al. (2015) referem ainda que a saturação térmica dos solos pode também ser atenuada pelo aproveitamento da temperatura do ar exterior em período noturno, ou seja, quando a temperatura ambiente se indicia mais baixa que a temperatura do solo. Nessa situação, dois tipos de estratégias podem ser adotados, nomeadamente por ventilação forçada ou natural. O recurso a um regime de ventilação forçada é indicado como a solução que permite uma recuperação mais apreciável da temperatura do solo, em comparação à empregabilidade de nenhum mecanismo que promova o transporte do ar, na medida em que, nesta última a sua recuperação é dada essencialmente pelos processos naturais de transmissão de calor que ocorrem no solo. Contudo, na adoção de um regime forçado deve persistir um compromisso entre os benefícios, em termos térmicos, e os consumos energéticos consentidos por esta estratégia, com o intuito de viabilizar o seu funcionamento em tais condições.

Por outro lado, a condutibilidade térmica dos solos encontra-se intimamente interligada como o fenómeno anteriormente referido. Esta propriedade térmica dita o quão bom condutor de calor é o solo. Assim, os permutadores de calor que estejam implementados em solos que apresentam uma condutibilidade térmica apresentaram melhor desempenho térmico. Este facto, de uma maior condutibilidade proporcionar que uma maior quantidade de calor se difunda para zonas mais longínquas, segundo a direção radial da superfície da tubagem, favorece que uma maior taxa de transferência de calor ocorra entre o ar albergado na tubagem e o solo envolvente (Bansal et al., 2013).

Todavia, a condutibilidade térmica dos solos, como referido no capítulo 2 do presente trabalho, é influenciada por diversos fatores, nomeadamente pelo conteúdo de água do próprio solo. Segundo Gao et al. (2016), o aumento do grau de saturação de um solo motiva o aumento da sua condutibilidade térmica, e, por conseguinte, favorece a sua transferência de calor por condução. Este facto deve-se aos vazios existentes entre as partículas sólidas do solo serem preenchidos por água, gerando pontes térmicas que favorecerão o contacto entre as partículas e, que por sua vez, promoverá o aumento da troca de calor entre estes, na medida que a água manifesta uma condutibilidade térmica superior à do ar. Porém, na utilização de permutadores de calor em período de Verão, o conteúdo de água do solo circundante ao sistema tende em afastar-se segundo a direção radial da tubagem (i.e., fonte de calor) em virtude da circulação do ar quente, sendo este fenómeno agravado pelo aumento do período de funcionamento do

permutador. A migração do conteúdo de água é promovida por forças motrizes geradas pela diferença da temperatura do solo entre as camadas adjacentes e as camadas mais afastadas da tubagem. O afastamento do conteúdo de água relativo à tubagem mostra-se mais suscetível de ocorrer para solos com reduzido conteúdo de água, visto apresentarem uma reduzida condutibilidade térmica conduzindo, portanto, a um maior gradiente de temperaturas.

De acordo com o que foi dito anteriormente, revela-se fundamental para a instalação de permutadores de calor ar-solo o conhecimento de como as propriedades térmicas dos solos podem interferir no seu desempenho. Segundo Ozgener (2011), a caracterização geológica do local de implementação destes sistemas constitui um dos primeiros passos do projeto a realizar, sendo que o projetista deverá recolher informações relativas à profundidade do substrato rochoso, à natureza do solo, assim como, das suas propriedades térmicas e hidráulicas. A existência de aquíferos, da sua capacidade de produzir água e da profundidade da água resguardada no reservatório subterrâneo, revelam-se outros dados a reunir. De acordo com estas informações, o autor refere que irão permitir orientar o projetista na seleção da geometria e do tipo de permutador a ser empregue.

3.2.3. Vantagens e desvantagens da sua utilização

Os permutadores de calor ar-solo, assim como todo outro sistema, apresentam um conjunto de vantagens e desvantagens da sua utilização. Tem-se verificado mediante o aprimoramento dos conhecimentos neste domínio, através dos inúmeros estudos realizados até há data, que algumas desvantagens que inicialmente impunham barreiras à sua utilização têm vindo progressivamente a sere colmatadas.

Com base no que foi dito anteriormente sobre os permutadores de calor, é perceptível que para além de se basearem numa energia alternativa, limpa e fiável, retratam um sistema *eco-friendly*, no ponto de vista de utilizarem apenas ar como fluido de trabalho. Por outro lado, os permutadores são também conhecidos pela vantagem de envolverem reduzidos consumos de energia elétrica, ao contrário dos sistemas ativos convencionais de aquecimento e arrefecimento. Os permutadores necessitam apenas da utilização de uma, ou mais caso necessário, unidade de ventilação para o seu funcionamento, minimizando conseqüentemente as questões referente aos consumos energéticos excessivos e das conseqüências adversas associadas à sua produção por fontes convencionais.

Por outro lado, os permutadores de calor ar-solo envolvem geralmente uma construção e um *design* bastante simples. Segundo Gao et al. (2016), estes sistemas comparativamente às bombas de calor geotérmicas, podem aduzir um investimento inicial de cerca de 30 a 50 % inferior, devido em particular ao menor número de componentes agregados ao sistema.

Outra grande vantagem da utilização dos permutadores constitui a sua capacidade de facultar tanto o efeito de aquecimento como de arrefecimento, em conformidade com o respeitante

período sazonal, superando assim, a utilização de outros sistemas passivos no sentido de alguns deles proporcionarem somente um dos efeitos referidos.

Existem dados indicativos de que os permutadores de calor ar-solo conseguem facultar as necessidades requeridas de aquecimento nas regiões mediterrânicas e tropicais, dispensando o auxílio de qualquer tipo de sistema ativo convencional de arrefecimento (Ozgener, 2011).

Contudo, na utilização desses sistemas como estratégia de climatização, nomeadamente em edifícios envolvendo a presença de pessoas, é fundamental garantir a qualidade do ar que é entregue ao espaço. São por vezes relatados na literatura problemas relacionados com a contaminação do ar exterior que é insuflado para o permutador de calor, nomeadamente pela presença de partículas voláteis, como poeiras e gases de escape dos veículos. À vista disso, é recomendado a utilização de filtros de partículas na boca de captação do ar, como mostra a figura 3.9, devendo estes serem sujeitos a uma manutenção periódica (substituição ou limpeza). É aconselhado também instalar o orifício de captação do ar a alguma distância da superfície do solo, com o intuito de minimizar a insuflação de partículas poluentes aglomeradas em zonas mais baixas, assim como, reduzir a insuflação do ar a temperatura mais elevada, nomeadamente em período de Verão (Barnard & Jaunzens, 2001).

Outro problema muito prenunciado na qualidade do ar refere-se ao crescimento microbiano, como fungos e bactérias, derivado da acumulação de condensados no interior da tubagem. Este problema pode ser provocado pela simples circulação do ar ao longo do permutador provocando a condensação de vapor de água, devido às diferenças de temperatura entre o ar e o ambiente subterrâneo, e/ou, da penetração de água na tubagem. Contudo, algumas soluções têm sido desenvolvidas de forma a evitar este dilema. Como podemos observar na figura 3.9, umas das estratégias é inclinar a tubagem, com 1 a 3%, com o intuito de criar uma linha de drenagem para um ponto de recolha dos condensados, onde estes poderão ser removidos através do auxílio de uma bomba de circulação de água (Vlad et al., 2011).

Outra solução para evitar a atividade microbiana é através da utilização de tubos com revestimento antimicrobiano. Estes tubos envolvem na sua superfície interna uma membrana composta por partículas de prata, cujo objetivo é prevenir o crescimento destes micro-organismos no interior da tubagem, atuando, assim, de forma decisiva na qualidade do ar que é insuflado para o espaço a climatizar (REHAU, 2009).

A movimentação do ar ao longo do permutador de calor pode eventualmente ser incluída nas desvantagens da sua utilização. Na adoção de uma velocidade de escoamento muito elevada, a deslocação do ar poderá provocar ruídos, que eventualmente poderão ser transmitidos e causar algum desconforto acústico no espaço a climatizar

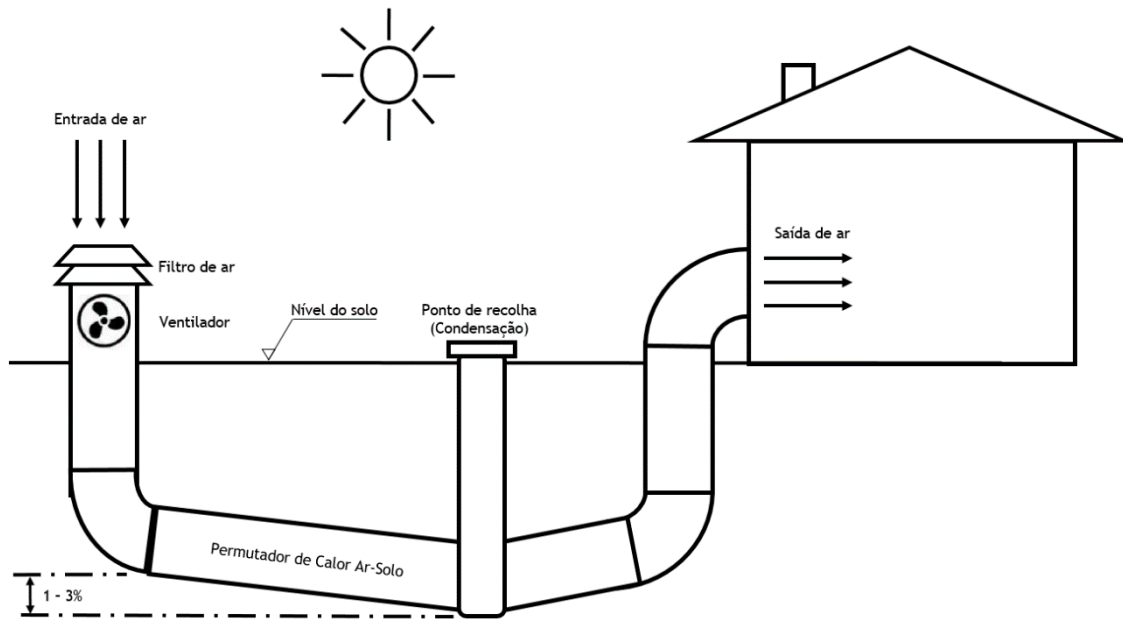


Figura 3.9 - Estratégia para remover a acumulação de condensados (inclinação dos tubos), adaptado de Vlad et al. (2011).

3.2.4. Análise energética

Os permutadores de calor ar-solo enquadram uma tecnologia de reduzidos custos de operação, visto este recorrer apenas à simples utilização de uma ou mais unidades de ventilação para o seu funcionamento. Apresentam-se seguidamente, com base nas expressões mais empregues na literatura, as equações referentes ao cálculo da potência de aquecimento/arrefecimento desses sistemas e ao respetivo coeficiente de desempenho (*COP - Coefficient of Performance*).

O desempenho térmico dos permutadores de calor é avaliado de acordo com a taxa de calor transferida, nomeadamente entre o ar presente no interior da tubagem e o solo circundante. Em conformidade com a época do ano, as potências de aquecimento (\dot{Q}_h) e de arrefecimento (\dot{Q}_c) podem ser calculadas, em *kW*, pelas equações (3.1) e (3.2):

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_{ar} c_{p,ar} (T_{saída} - T_{entrada}) \quad (3.1)$$

e

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{ar} c_{p,ar} (T_{entrada} - T_{saída}) \quad (3.2)$$

Em que:

- $T_{entrada}$ e $T_{saída}$ [$^{\circ}C$] representam a temperatura do ar à entrada e à saída do permutador;
- $c_{p,ar}$ [$\frac{kJ}{kg \cdot K}$] representa o calor específico do ar a pressão constante (considerando o valor médio da temperatura entre $T_{entrada}$ e $T_{saída}$);
- \dot{m}_{ar} [$\frac{kg}{s}$] representa o caudal mássico de ar.

Por sua vez, o caudal mássico pode ser calculado pela expressão (3.3):

$$\dot{m}_{ar} = \rho_{ar} \frac{\pi d^2}{4} v_{ar} \quad (3.3)$$

Em que:

- ρ_{ar} [$\frac{kg}{m^3}$] representa a massa específica do ar (considerando o valor médio da temperatura entre $T_{entrada}$ e $T_{saída}$);
- d [m] representa o diâmetro interno do tubo;
- v_{ar} [$\frac{m}{s}$] representa a velocidade média do ar ao longo do permutador.

Quanto ao coeficiente de desempenho, este representa um índice intrínseco na análise de permutadores de calor ar-solo, indicando o quão o sistema é eficiente. O COP mede a razão entre a potência térmica do permutador e a potência elétrica que a unidade, ou as unidades, de ventilação necessitam para gerar o caudal de ar requerido. Seguindo a mesma lógica, o coeficiente de desempenho pode ser contabilizado de acordo com a época do ano, ou seja, referente ao índice de eficiência do sistema para aquecimento (COP_h) ou para arrefecimento (COP_c), podendo estes serem calculados pelas seguintes equações (3.4) e (3.5):

$$COP_h = \frac{\dot{Q}_h}{\dot{W}} \quad (3.4)$$

Ou

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} \quad (3.5)$$

Em que: \dot{W} [W] representa a potência eléctrica do ventilador, ou dos ventiladores empregues.

3.3. Aplicações em Portugal

Na secção que se segue são expostas algumas aplicações de permutadores de calor ar-solo em Portugal. As informações encontradas na literatura incidem essencialmente na empregabilidade de permutadores de calor ar-solo em edifícios. É de referir que em alguns casos as informações disponíveis não tenderam a ser as mais completas, contudo estes casos foram ainda assim considerados.

3.3.1. Edifício Oásis

A “Casa Oásis”, situada em Estoi (Faro - Algarve), representa um dos exemplos nacionais de um edifício de habitação unifamiliar integrando na sua conjuntura a adoção de um leque de estratégias passivas, visando a eficiência energética do edifício.

Construída em 2003 e reabilitada em 2015 pela empresa *OASIS - Engenharia e Construção*, este edifício integra como soluções, com intuito de promover o seu conforto térmico interno, a utilização de amplos vãos envidraçados orientados a Sul do edifício, para aumentar os ganhos solares em período de aquecimento (ganho direto). Apresenta também, paredes de armazenamento energia térmica (sistema de ganho indireto), absorvendo a energia solar nela incidente em período diurno, através de envidraçados em policarbonato, sendo em período noturno transferida para o espaço a aquecer. Em todos estes locais, o edifício dispõe de palas e estores de forma a impedir a introdução indesejada da radiação solar em período de Verão. Como estratégia passiva de climatização, a moradia recorre ao aproveitamento da energia geotérmica de muito baixa profundidade através de um permutador de calor ar-solo. Este sistema envolve um conjunto de 8 tubos instalados a 2 m de profundidade, as quais apresentam, cada um, 25 m de comprimento. A boca de admissão do ar encontra-se integrada a uma estufa, tendo como objetivo em período de Inverno pré-aquecer o ar que se encontra no seu interior, para *a posteriori* ser insuflado para o interior do edifício. Em período de Verão a estufa encontra-se aberta de modo a não aumentar, ainda mais, a temperatura do ar e não afetar o arrefecimento da moradia (Gonçalves & Nascimento, 2005).

Embora na literatura não haja dados reais sobre resultados conseguidos por estas estratégias, é de realçar que a “Casa Oásis” foi premiada em 2003, em consequência do seu bom desempenho ao nível de eficiência energética (Gonçalves & Nascimento, 2005).

3.3.2. Edifício Borboleta

A 'Casa Borboleta', também ela premiada em 2003 em virtude da sua eficiência energética, localiza-se em Barão de S. Miguel (Vila do Bispo-Algarve). Este edifício enquadrou-se num projeto que envolveu o desenvolvimento de uma urbanização residencial unifamiliar e de um spa (*AlmaVerde - Village and Spa*), em 2002. Financiado pelo programa Europeu THERMIE, o projeto visou a construção de 180 habitações aduzindo soluções passivas para satisfazer as necessidades requeridas de aquecimento e arrefecimento (Gonçalves & Nascimento, 2005).

Uma das estratégias implementadas, designada pelo projeto de sistema *Coolhouse*, exemplificado na figura 3.10, tem como princípio promover o conforto térmico no interior da habitação, através da utilização do solo como fonte ou dissipador de energia térmica para aquecer e arrefecer a moradia, de acordo com a respetiva época do ano, por intermédio de um permutador de calor ar-solo instalado na parte exterior do edifício.

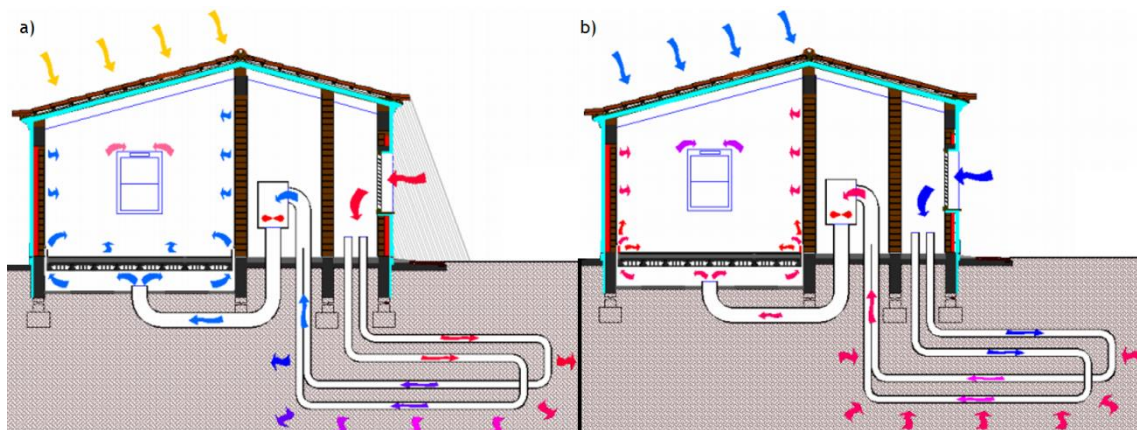


Figura 3.10 - Princípio de funcionamento do sistema *Coolhouse* em modo de: a) arrefecimento (Verão) e b) aquecimento (Inverno). Adaptado de Burton (2004).

Pode observar-se na figura 3.11 que o permutador apresenta dois tubos em PVC instalados horizontalmente e espaçados entre si por 2 m. Estas envolvem um comprimento total e um diâmetro de cerca de 60 m e 0,16 m, respetivamente, e encontram-se acomodadas entre os 1,5 m e 2 m de profundidade, apresentando uma ligeira inclinação. Por forma a minimizar as perdas de carga, o último tubo foi instalado com um ângulo de 45°. É de referir ainda, que o permutador de calor ar-solo detém um ponto de recolha dos condensados possibilitando a sua extração e a limpeza do sistema (Monteiro, 2008).

Segundo Monteiro (2008), o permutador faz recurso a uma unidade de ventilação (170W) instalado à saída do mesmo conjuntamente com um sistema de filtragem do ar. O ventilador permite proporcionar uma velocidade máxima do ar de 4 m/s, podendo eventualmente ser reduzida dado a sua capacidade de regulação. No entanto, caso o permutador não proporcione as condições de conforto térmico desejado, cada edifício é constituído por uma caldeira de condensação a gás para complementar as necessidades requeridas.



Figura 3.11 - Implementação do permutador de calor na ‘Casa Borboleta’ (Gonçalves & Nascimento, 2004).

Embora não haja registos de monitorização referentes, somente, aos resultados conseguidos pelo permutador instalado na ‘Casa Borboleta’, existe um relatório publicado por Burton (2004), divulgando dados de uma outra moradia integrada na urbanização, nomeadamente a moradia n° 54, que incorpora um permutador de calor ar-solo de características similares. A monitorização decorreu durante o ano de 2003, tendo-se verificado que o sistema *Coolhouse* possibilitou em período de arrefecimento reduções de 11 °C na temperatura do ar exterior, e, em período de Inverno permitiu aumentos da temperatura do ar exterior de cerca de 8 °C.

3.3.3. Edifício Solar XXI

O edifício “Solar XXI”, construído no campus do Lumiar (Lisboa) em 2005, representa um edifício multifuncional, envolvendo escritórios de trabalho, laboratórios e salas de reuniões, apresentando-se distribuído por três pisos, estando um deles semi-enterrado (INETI, 2005).

Este edifício integra um conjunto de tecnologias e soluções passivas que promovem a sua eficiência energética. Para além da otimização da qualidade térmica da sua envolvente, tendo sido aplicado um isolamento adequado na parte exterior do edifício; da orientação da sua fachada principal para Sul, para maximizar o aproveitamento dos ganhos solares, em período de arrefecimento; da produção de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, integrados na sua fachada principal, e do aproveitamento do calor produzidos pelos mesmos; foi empregue como solução passiva para o arrefecimento do espaço interior o aproveitamento dos benefícios concedidos pelo solo a muito baixa profundidade através da utilização de um permutador de calor ar-solo (INETI, 2005). Apresentam-se nas figuras 3.12 e 3.13 alguns pormenores desta estratégia.

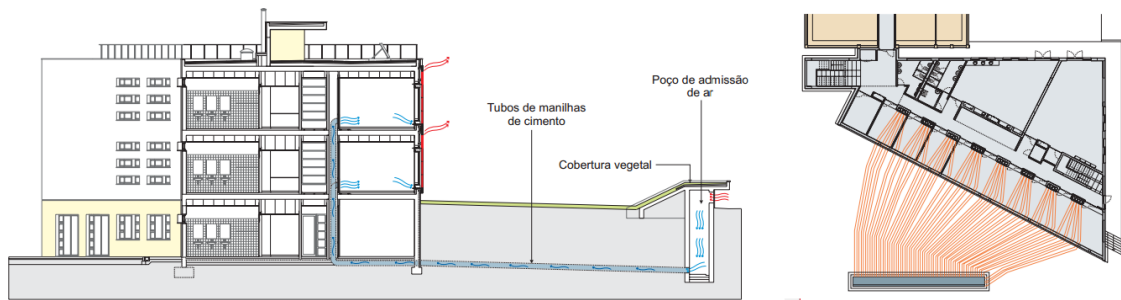


Figura 3.12 -Esquemáticação do permutador de calor ar-solo do edifício Solar XXI. Adaptado de INETI (2005).



Figura 3.13 - Pormenores da instalação da tubagem (manilhas de cimento). Adaptado de INETI (2005).

O permutador apresenta um conjunto de 32 tubos (manilhas de cimento) enterrados horizontalmente a uma profundidade de 4,6 m, os quais apresentam um diâmetro de 30 cm. Segundo INETI (2005), a tal profundidade o solo apresenta temperaturas ao longo do ano que rondam entre os 16 e os 18 °C. Cada tubo apresenta um comprimento de 15 m, distância referente entre o local de admissão de ar e o edifício “Solar XXI” (piso semi-enterrado), e incorporam uma unidade de ventilação de 30 W instalado à saída dos mesmos (Rodrigues et al., 2010 *in* Lopes, 2012). Estes autores referem ainda que o permutador permite que a temperatura do espaço interno seja reduzida numa gama de valor compreendida entre os 2 e 3 °C.

3.3.4. Edifício Porto Santo

A “Casa Solar Passiva Porto Santo”, situada como o nome indica, na Ilha de Porto Santo (Sítio da Ponta - Arquipélago da Madeira), indicia-se outro edifício em território português, utilizado como centro de investigação e seminários. Finalizada a sua construção em 1985, este edifício dispõe um conjunto de soluções passivas direcionadas para o arrefecimento e aquecimento dos seus 95m² de área útil espalhados pelos seus dois pisos (Gomes, 2010).

Um das estratégias empregues para o seu arrefecimento retrata a utilização de um permutador de calor ar-solo. Este baseia-se num conjunto de 22 tubos em betão (manilhas de cimento) enterrados a 1,7 m de profundidade. Cada tubo apresenta um comprimento de 12 m e um diâmetro de 30 cm (Gomes, 2010). Pode observar-se na figura 3.14 alguns pormenores relativos a implementação do sistema.



Figura 3.14 - Pormenores da instalação da tubagem (manilhas de cimento). Adaptado de Gomes (2010).

O permutador não faz recurso a nenhum sistema de ventilação forçada, sendo que o ar é admitido para o interior do edifício por ação térmica (efeito cheminé). São observáveis na figura 3.15 as bocas de captação de ar do permutador e as respetivas saídas de ar para o interior do edifício.



Figura 3.15 - Pormenores relativos a localização das bocas de admissão de ar (à esquerda) e das bocas de saída para o interior do edifício (à direita). Adaptado de Gomes (2010).

Mediante a conjugação das soluções passiva implementadas, em termos médios, durante o período de aquecimento permitiram proporcionar que a temperatura do ar no interior da habitação permanecesse aproximadamente 4 °C superior à temperatura exterior, quando esta variava entre 19,5 e 21 °C. Em período de Verão, denotou-se uma reduzida diminuição da temperatura do ar exterior de cerca de 1 °C, embora esta variasse entre 21,5 e 22 °C (Gomes, 2010).

3.4. Nota conclusiva

No capítulo que agora termina abordou-se a temática do arrefecimento e aquecimento pelo solo. Inicialmente apresentou-se a forma de energia associada a energia geotérmica, e os domínios que a envolvem, expondo consecutivamente os possíveis modos aproveitamento e as aplicações associadas. Posteriormente o capítulo é particularizado para o domínio da energia geotérmica de muito baixa profundidade, nomeadamente pelo seu aproveitamento através da empregabilidade de permutadores de calor ar-solo. Foi demonstrado o seu princípio de funcionamento e as possíveis configurações que estes podem assumir, tendo sido analisados e discutidos os parâmetros e fatores mais relevantes que influenciam o seu desempenho. Foram apresentadas as vantagens e desvantagens mais pertinentes da utilização dos permutadores de calor ar-solo, assim como, as fórmulas matemáticas referentes ao cálculo da sua potência térmica e do coeficiente de desempenho (*COP*). Por último, apresentaram-se de algumas aplicações reais destes sistemas em Portugal.

No capítulo que se segue far-se-á a apresentação das unidades experimentais desenvolvidas para o presente estudo.

Capítulo 4

4. Unidades experimentais

No capítulo anterior foi abordada a temática da energia geotérmica. Foram apresentadas as diversas vertentes que a compõe e respectivas aplicações, particularizando, posteriormente, para o domínio energia geotérmica de muito baixa profundidade. Foram abordadas as suas possíveis formas de aproveitamento, dando especial atenção à sua utilização através do uso de permutadores de calor ar-solo. À vista disso, foram expostos os seus princípios de funcionamento e as possíveis configurações que estes podem adotar. Foram analisados e discutidos os diversos parâmetros e fatores que podem de alguma maneira interferir no seu desempenho, assim como, as vantagens e desvantagens da sua utilização. Por último, foram apresentadas as expressões matemáticas referentes ao cálculo da potência térmica e ao coeficiente de desempenho (*COP*) relativos a estes sistemas, assim como, à apresentação de algumas aplicações reais em solo português.

O capítulo que se segue remete a apresentação das unidades experimentais desenvolvidas no âmbito deste trabalho. Este capítulo direciona-se para a descrição detalhada dos aspetos e procedimentos construtivos, e de implementação do elemento central deste trabalho, o permutador de calor ar-solo, seguido pela descrição das sondas desenvolvidas para a monitorização da temperatura dos solos. Para cada unidade experimental são evidenciados os equipamentos empregues para a sua construção e implementação, bem como, os respetivos locais de instalação. Este capítulo finaliza expondo detalhadamente as especificações dos equipamentos auxiliares empregues, os quais sustentaram a realização do presente estudo.

4.1. Permutador de calor ar-solo

Nesta secção é caracterizado pormenorizadamente o permutador de calor desenvolvido, sendo apresentadas todas as suas especificações referentes ao seu dimensionamento, assim como todas as etapas e metodologias empregues para a sua construção e instalação, expondo, por fim, a sua localização geográfica.

Numa descrição sucinta, o permutador de calor ar-solo proposto apresenta um formato compacto, envolvendo um circuito de tubagem, em PVC, helicoidal quadrangular. As únicas partes visíveis à superfície fazem referência a uma parcela dos respetivos tubos de admissão e extração de ar, na medida que o permutador apresenta um circuito do tipo aberto. Este equipamento tem, assim, como finalidade proporcionar arrefecimento ou aquecimento do ar exterior, nos alusivos períodos sazonais, através do aproveitamento das diferenças de temperatura ocorridas entre o subsolo e o ambiente externo.

4.1.1. Descrição do permutador

Genericamente, os permutadores de calor ar-solo evidenciados na literatura apresentam um formato que abrange uma vasta área de ocupação do solo, de forma a proporcionar uma elevada área de troca de calor com o solo circundante. Porém, devido às adversidades associadas às restrições de espaço, nomeadamente em áreas urbanas, ou ainda, às restrições associadas a aspetos geológicos, como por exemplo, áreas amplamente rochosas, este trabalho visa propor um sistema compacto e de *design* ainda não apresentado no contexto de estudos realizados anteriormente. Exibe-se na figura 4.1 o formato recorrido para o permutador. Esta estratégia de disposição dos tubos permite-lhe proporcionar uma elevada área de contacto com o solo envolvente para um volume de ocupação reduzido, potencializando, conseqüentemente, a captação ou a dissipação do calor através deste.

Adicionalmente, observa-se na figura que a zona inferior do permutador alberga uma maior área de tubagem. Esta estratégia teve como objetivo maximizar o aproveitamento das temperaturas apresentadas pelo solo a profundidades mais baixas, estando o permutador mais preservado das perturbações externas, nomeadamente das oscilações diárias da temperatura do ar exterior e dos efeitos de aquecimento/arrefecimento do solo decorridos ao longo dos diversos períodos sazonais.

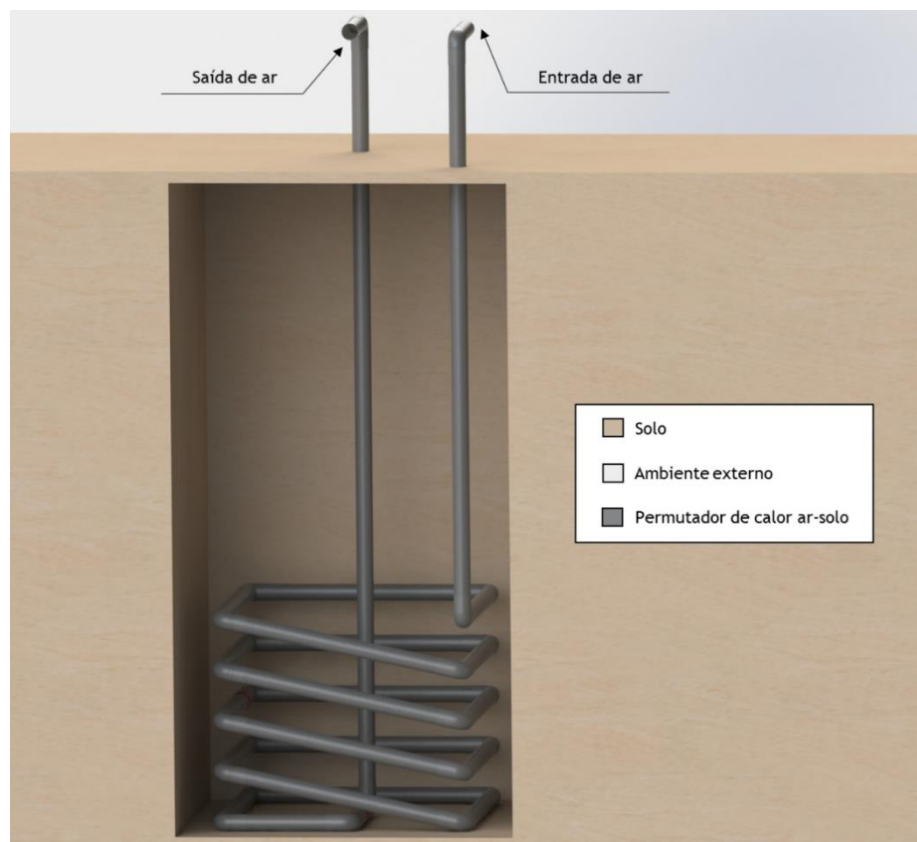


Figura 4.1 - Esquema exemplificativo, realizado em SolidWorks™, do permutador de calor ar-solo proposto.

Quanto ao princípio de funcionamento do permutador, este baseia-se na admissão do ar exterior, por intermédio de uma, ou duas, unidades de ventilação, percorrendo assim os sucessivos cinco patamares de tubagem, concedendo tempo para que o ar se aclimatize gradualmente à temperatura apresentada pelo solo circundante. Observa-se adicionalmente na figura anterior que o penúltimo troço de tubagem se encontra disposto na vertical, este tem como objetivo reduzir o tempo de deslocação do ar entre o ponto situado à profundidade mais baixa, base do permutador, e o “espaço a climatizar”, minimizando, assim, as alterações de temperatura do ar durante este percurso.

4.1.1.1. Especificações do permutador

Em conformidade ao que foi salientado no capítulo 3, existe um leque de parâmetros que se encontram filiados ao desempenho térmico e energético dos permutadores de calor ar-solo. Nesta secção encontram-se elucidadas todas as escolhas optadas para o dimensionamento do permutador proposto e outros parâmetros alusivos à melhoria do desempenho do mesmo. É de referenciar que todas as escolhas foram fundamentadas por conhecimentos adquiridos através da realização da pesquisa bibliográfica anteriormente publicada.

No que diz respeito ao material do permutador assim ficou clarificado os benefícios associados à utilização de tubos em PVC, particularmente monetários, daí a sua ampla utilização em inúmeros trabalhos experimentais realizados até à data. Ademais, o desempenho térmico dos permutadores constituídos por tubos em betão, aço inoxidável, polietileno ou até mesmo argila, revelam apenas uma ligeira melhoria face aos alcançados por tubos PVC (Ahmed *et al.*, 2016 e Sousa, 2014), podendo-se desta forma optar pela solução mais barata. Além disso, outros aspetos foram ponderados para a escolha do material, nomeadamente, a simplicidade de montagem, resistência e durabilidade da tubagem, tendo-se optado na utilização de tubos e acessórios em PVC.

Ao contrario do tipo de material, o diâmetro dos tubos indicia-se um dos parâmetros que afeta substancialmente o desempenho dos permutadores calor. Tal como sugerido na literatura, a adoção de tubos com um diâmetro reduzido permite que o ar no interior da tubagem alcance uma temperatura mais próxima da temperatura do solo envolvente. À vista disso, e em conformidade com as gamas geralmente adotadas em estudos experimentais desta natureza, o diâmetro (externo) escolhido para os tubos foi de 0,075 m com uma espessura parede de 1,5 mm.

Resumidamente encontra-se na tabela 4.1 os parâmetros alusivos às características geométricas, físicas e térmicas dos tubos selecionados, estimado como genérico segundo a ficha técnica obtido a partir do fabricante (Politejo, POLIDOM SÉRIE B), de acordo com a norma EN1329.

Tabela 4.1 - Características geométricas, físicas e térmicas dos tubos e acessórios em PVC.

Tubo de PVC-U com ligação do tipo SB				
Diâmetro externo [m]	Espessura [m]	Massa volúmica [kg/m ³]	Calor específico [kJ/kg K]	Condutibilidade térmica [W/mK]
0,075	0,0015	1500	1,0048	0,15

Relativamente ao comprimento do permutador de calor, este foi definido mediante as dimensões predominantes encontradas na literatura. Assim, com base nos benefícios associados à adoção de um longo circuito de permuta de calor, optou-se por um comprimento total de cerca de 29 m (28,65 m).

Para a escolha da profundidade de implementação do permutador de calor teve-se em conta, essencialmente, os custos associados ao processo de escavação, na medida que nos projetos desta natureza este custo apresenta-se como relevante na escolha da profundidade. Assim, considerou-se que a profundidade de 3 metros representa um bom compromisso entre o custo da escavação e os benefícios associados a uma elevada profundidade.

Relativamente ao espaçamento entre os cinco patamares do circuito de permuta, estes encontram-se distanciados entre si por 0,150 m, distância correspondente a duas vezes o diâmetro externo do tubo considerado, dito segundo De Paepe & Willems (2001), *in* Florides & Kalogirou (2007), como distância limite entre cada tubo relativo à sua influência na temperatura do solo circundante. Esta escolha foi também tida em conta de modo a garantir um compromisso entre o comprimento total e o volume ocupado pelo permutador.

Por último, adotou-se um regime de ventilação forçada para os ensaios experimentais, tendo como finalidade proporcionar um caudal de ar mais elevado face aos conseguidos por ventilação natural, enquadra-se este valor na gama de valores adotados na literatura. Foram, assim, empregues dois caudais volumétricos com o objetivo de analisar o efeito da variação deste parâmetro no desempenho (térmico e energético) do permutador proposto.

Apresenta-se na tabela 4.2 um resumo das especificações referentes ao permutador de calor ar-solo.

Tabela 4.2 - Tabela resumo das especificações do permutador.

Permutador de calor ar-solo					
Comprimento total [m]	Diâmetro externo do tubo [m]	Espessura do tubo [m]	Profundidade máxima [m]	Área total superfície [m ²]	Caudal volumétrico [m ³ /h]
28,93	0,075	0,0015	3	6,751	27,9 51,3

4.1.2. Construção do permutador

Após selecionados e apresentados todos os parâmetros referentes ao permutador, descrevem-se na secção que se segue todas as etapas realizadas para a sua construção.

Primeiramente, realizaram-se os respetivos cortes dos tubos de PVC, através de uma serra de arco manual, em segmentos com os seguintes comprimentos: 3,438 m; 2,538 m; 1,03 m; 1 m; 0,45 m; e 0,3 m. No total obtiveram-se quinze tubos de comprimento de 1 m; quatro tubos de 1,03 m, dois tubos de 0,45 m; dois tubos de 0,3 m; um tubo de 3,438 m; e um tubo de 2,538 m. Pode observar-se na figura 4.2 uma fotografia relativa ao processo de corte.



Figura 4.2 - Fotografia do processo de corte dos tubos

Finalizado o processo de corte iniciou-se o acoplamento dos diversos tubos por intermédio das curvas de 90°, seguindo o correto sentido de montagem. Apresenta-se na figura 4.3 uma fotografia onde se pode observar a fixação do primeiro patamar, nomeadamente a base do permutador.

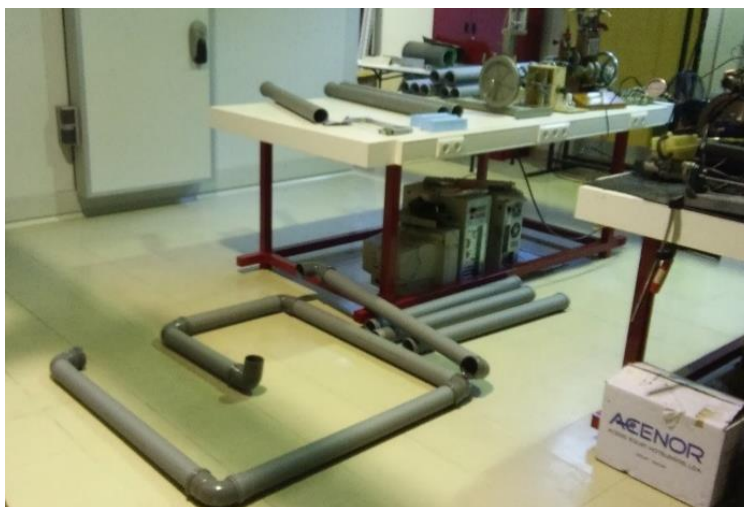


Figura 4.3 - Fotografia relativa à fixação do primeiro patamar (base) do permutador.

Nas uniões entre tubos, realizadas por cabeças de acoplamento, foram aplicadas as respectivas juntas de vedação (anéis de borracha), com o objetivo de evitar a saída ou a entrada de ar, penetração de água ou outro tipo de impurezas que possam afetar o bom funcionamento do sistema. É de referir que foi utilizado uma massa lubrificante nas juntas de borracha, com o propósito de facilitar o acoplamento dos tubos às curvas de 90°.

Porém, nas uniões que não contêm qualquer tipo de acoplamento foi necessário moldar as respectivas pontas, amolecendo-as por intermédio de uma pistola de ar quente, com o intuito de possibilitar o acoplamento dos respetivos tubos às curvas de 90°. Foi ainda aplicado uma cola (Tangit, PVC-U) nas respetivas superfícies, com a intenção de fixar os dois elementos e garantir a mesma finalidade que as juntas de borracha.

De com o que foi referido na secção 4.1.1.1, foram construídos uns espaçadores de forma intervalar cada patamar com o devido espaçamento, de maneira a minimizar as interferências térmicas entre este, visando o melhor desempenho térmico do permutador de calor. Estes espaçadores também têm como objetivo garantir suporte e estabilidade ao permutador. Para a sua construção foram utilizadas placas de *roofmate*, em poliestireno extrudido, com uma espessura de 5 cm, sendo que estas foram cortadas com o formato da tubulação, ou seja, com um orifício de diâmetro equivalente a 0,075 m, através de um molde construído em madeira e revestido por fita adesiva em liga de alumínio. Foi estabelecido um espaçamento entre cada extremidade das semicircunferências de 150 mm. O processo de corte foi realizado por “fio quente”, tendo-se definido na fonte de alimentação uma tensão de 10 V, valor definido como adequado ao efeito requerido. Apresentam-se na figura 4.4 fotografias que permitem visualizar os pormenores construtivos associados aos espaçadores.

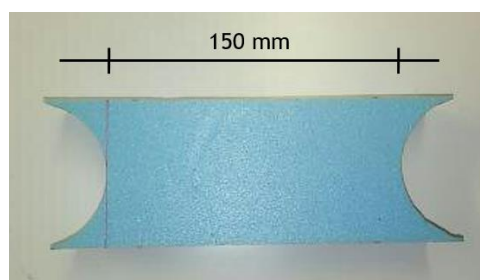


Figura 4.4 - Fotografias relativas aos espaçadores e respectiva construção.

Finalizada a concepção dos dezasseis espaçadores, estes foram aplicados, mediante o acoplamento dos sucessivos patamares, em lados opostos do permutador e fixados por intermédio de uma fita adesiva. Exibe-se na figura 4.5 uma fotografia da montagem finalizada dos cinco patamares do permutador com os respetivos espaçadores.



Figura 4.5 - Fotografia da montagem dos cinco patamares do permutador.

Para analisar a variação da temperatura do ar ao longo do circuito de permuta e, conseqüentemente, avaliar o seu desempenho térmico, foi necessário instrumentar o permutador. À vista disso, foram empregues termopares do tipo K (Omega Engineering Inc., GGK24), em Cromoníquel - Níquel, os quais apresentam um revestimento exterior em trança de fibra de vidro. A junção dos dois condutores foi efetuada no laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor (DEM - UBI) por fusão num banho de mercúrio.

A monitorização do ar ao longo do permutador é realizada mediante seis pontos de medição, os quais se encontram assinalados a vermelho, de A a E, na figura 4.6. A ordem alfabética dita o sentido do escoamento do ar. É de referir que não foi possível garantir exactamente a mesma distância entre pontos de medição, visto que ao estabelecer a posição inicial e final, alguns pontos intermédios se encontravam demasiado próximo das curvas de mudança de direcção, o que poderia causar alguma influência na medição da temperatura do ar, devido ao regime de turbulência que o escoamento poderá assumir nessas zonas.

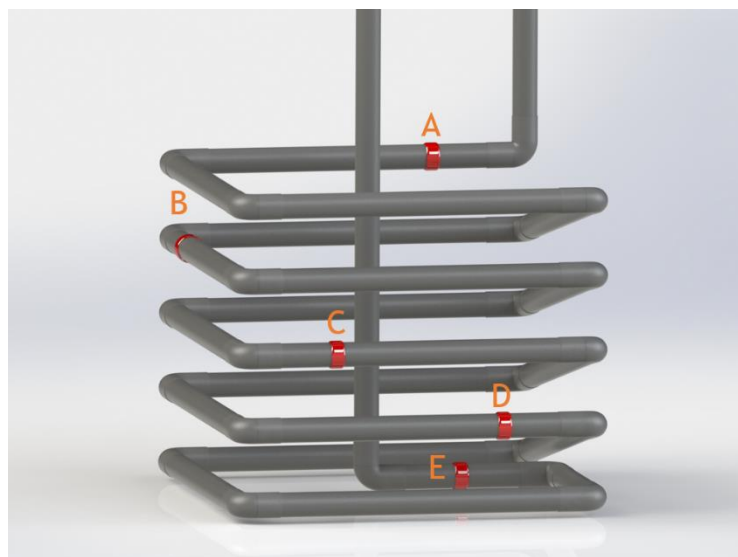


Figura 4.6 - Localização dos termopares ao longo do permutador.

Apresenta-se na tabela 4.3 as distâncias entre cada ponto de medição e as respetivas profundidades. Os sinais positivos e negativos indicam a localização, em altura ou profundidade dos pontos de medição, ou seja, se estes situam-se acima ou abaixo do nível do solo.

Tabela 4.3 - Distância entre cada ponto de medição ao longo do permutador e as profundidades associadas.

	Entrada	A	B	C	D	E	Saída
Distância [m]	3,20	5,53	5,53	4,98	5,53	4,16	
Profundidade [m]	(+) 0,56	(-) 2,2	(-) 2,40	(-) 2,59	(-) 2,78	(-) 2,96	(+) 0,56

Relativamente ao processo de furação para a instalação dos termopares, este foi realizado por intermédio de um prego aquecido, para minimizar a introdução de detritos no interior do sistema. Porém, dada a difícil acessibilidade ao interior dos tubos para a implementação das junções de medida dos termopares ao centro geométrico da respetiva secção transversal, decidiu-se recorrer a uma marca limite assinalada no termopar estabelecendo a distância requerida, nomeadamente metade do diâmetro externo da tubulação, 3,75 cm. Foi utilizada uma resina de dois componentes de secagem progressiva (Ceys, Araldit Rapid) para fixar os termopares à tubulação e garantir a impenetrabilidade de qualquer fluido ao interior do circuito.

Para a proteção dos termopares de quaisquer danos que poderiam suceder durante a sua implementação e visando a sua longevidade, decidiu-se inseri-los num tubo de borracha flexível fixado ao permutador com a mesma resina referida anteriormente. Pode observar-se na figura 4.7 os pormenores correspondentes à instalação de um dos termopares e da sua fixação ao permutador.



Figura 4.7 - Pormenores da instrumentação do permutador.

Exibem-se nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10 as representações esquemáticas das várias vistas do permutador após finalizada a sua construção.

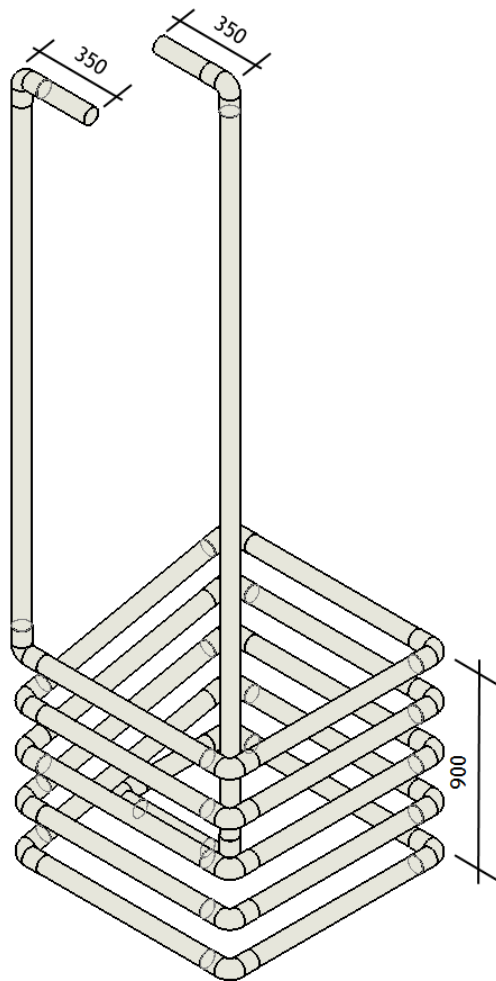


Figura 4.8 - Vista isométrica do permutador (dimensões em milímetros).

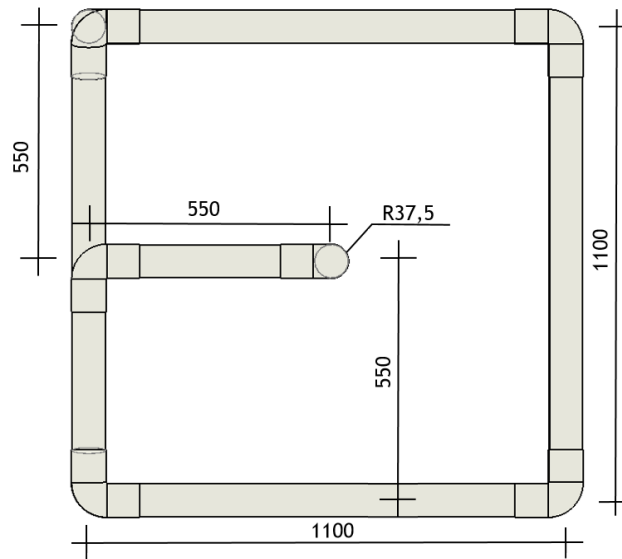


Figura 4.10 - Vista inferior do permutador (dimensões em milímetros).

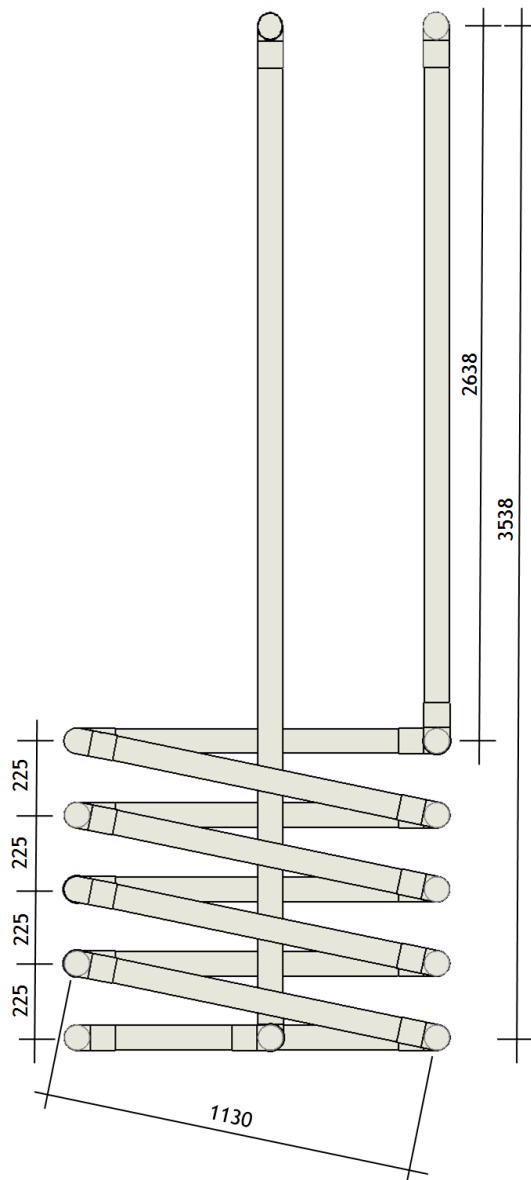


Figura 4.9 - Vista lateral do permutador (dimensões em milímetros).

4.1.3. Implementação do permutador

Após a construção do permutador de calor ar-solo procedeu-se à sua implementação no local estipulado. Pode observar-se na figura 4.11 a localização geográfica do permutador, o qual encontra-se assinalado pelo um círculo amarelo. Este situa-se nas instalações da Universidade da Beira Interior (Covilhã - Portugal), mais precisamente na Faculdade de Engenharia junto ao edifício do *CFIUTE* (Centro de Formação Interação UBI Tecido Empresarial) de acordo com as coordenadas GPS 40° 16' 43" N 7° 30' 48" W. Para simplificar a sua designação ao longo do presente trabalho, esta localização foi, definida como local A.



Figura 4.11 - Localização geográfica do permutador.

Dada a estreita acessibilidade ao local de enterramento, foi necessário a utilização de uma mini retroescavadora. Uma vez que o equipamento possui uma capacidade máxima de profundidade de escavação de 2,5 m, para atingir os três metros de profundidade, objetivo estabelecido antes da implementação do permutador, foi necessário efetuar uma rampa mediante o decurso do processo de escavação, como pode ser visualizado na figura 4.12. Mediante as dimensões geométricas do permutador efetuou-se um buraco de aproximadamente 3 m de profundidade com uma área de secção de 2,25 m² (1,5 m × 1,5 m).

Observa-se adicionalmente na figura que o permutador antes da sua instalação, não incorporava os tubos verticais, responsáveis pela admissão e extração de ar, pelo facto de facilitar o seu transporte para o local



Figura 4.12 - Fotografia do permutador e do processo de escavação do buraco.

Alcançados os três metros de profundidade, procedeu-se à recolha de uma amostra homogeneizada do solo representativo, para posteriormente ser submetida a uma análise granulométrica, tendo sido esta apresentada na secção 2.5 da presente dissertação, e de seguida à implementação do permutador do calor.

Pode-se observar-se na figura 4.13 a metodologia empregue para a sua acomodação ao buraco efetuado. O processo baseou-se essencialmente no nivelamento do solo, base do permutador, e dos sucessivos cinco patamares do circuito de permuta.

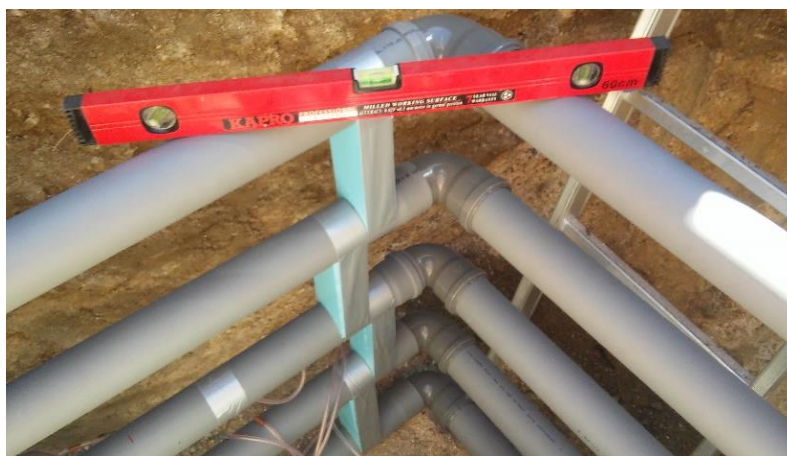


Figura 4.13 - Pormenores do nivelamento dos patamares.

Nas zonas circundantes ao circuito de permuta um cuidado extra foi tido em conta relativamente à reposição da terra. Esta precaução teve em conta evitar quaisquer estragos provocados pelo desabamento de rochas ou outros tipos de elementos maciços, e, de modo a minimizar espaços vazios circundante ao permutador, com o intuito de promover toda a área disponível deste com o solo envolvente, maximizando assim as trocas térmicas entre os dois

corpos. Na primeira fotografia da figura 4.14 exibe-se o preenchimento do buraco com o respetivo solo, seguido, na segunda fotografia, pela conclusão do enterro do permutador de calor. É possível observar adicionalmente que os seis conetores responsáveis pela ligação dos termopares às entradas analógicas do sistema de leitura e registo dos dados (*data logger*), encontram-se resguardados em conjunto com o intuito de possibilitar a ligação e visualização do valor da temperatura do ar em cada localização do permutador em simultâneo.



Figura 4.14 - Enterro do permutador e sua conclusão.

Visualiza-se na fotografia da figura 4.15 a incorporação dos respetivos tubos horizontais, visando o acoplamento das unidades de ventilação ao circuito de permuta de calor. Pode

observar-se a incorporação de uns componentes concêntricos nas respectivas bocas de admissão e extração de ar, para possibilitar o acoplamento dos ventiladores a estas, visto estes possuírem diâmetros diferentes.



Figura 4.15 - Fotografia dos tubos de admissão (em baixo) e extração de ar (em cima).

Por fim, houve ainda a necessidade de construir uma proteção, em madeira, em torno do permutador com o intuito de prevenir qualquer incidente oriundo de ação humana e/ou animal, que pudessem de alguma forma danificar o sistema. Apresenta-se na figura 4.16 uma fotografia o invólucro protetor construído com esse fim.



Figura 4.16 - Fotografia do invólucro protetor contruído para proteção bas bocas do permutador.

4.2. Sondas de medição da temperatura do solo

Nesta secção segue-se a caracterização das sondas desenvolvidas para a medição da temperatura do solo de três locais diferentes, apresentando todos os aspetos inerentes à construção, implementação destas, assim como, os equipamentos empregues nos alusivos procedimentos. São ainda apresentadas as localizações geográficas da aplicação das referentes sondas.

A monitorização da temperatura do solo constitui uma análise de extrema importância, seja do ponto de vista do conhecimento da variação da temperatura do solo em função do tempo e da profundidade, que varia localmente devido características individuais de cada zona (composição e propriedades térmicas), como também no contexto da viabilidade do local na implementação de sistemas de aproveitamento geotérmicos de muito baixa profundidade.

4.2.1. Descrição das sondas

No sentido do que fora referido anteriormente e dada a relevância da monitorização deste parâmetro, foram construídas três sondas, implementadas em três localizações distintas, com o intuito de realizar medições da temperatura do solo, metro a metro, até aos 5 m de profundidade. Estas sondas visam o estudo da variação da temperatura de cada solo com a profundidade, mediante a realização de medições semanais e por períodos de 24 horas. Exibe-se na figura 4.17 uma fotografia de uma das sondas desenvolvidas antes da sua implementação.



Figura 4.17 - Fotografia da primeira sonda desenvolvida para a monitorização da temperatura do solo (instantes antes da sua implementação).

4.2.2. Construção das sondas

Tendo-se estabelecido os 5 m de profundidade como ponto máximo para a medição da temperatura do solo, construíram-se três guias com 5,25 metros de comprimento em tubo rígido VD (PVC) com um diâmetro externo de 16 mm (IBOTEC, tubo VD). Como podemos observar na figura 4.18, para a instrumentação das sondas foram efetuadas cinco furações, distanciadas de igual forma por um metro.

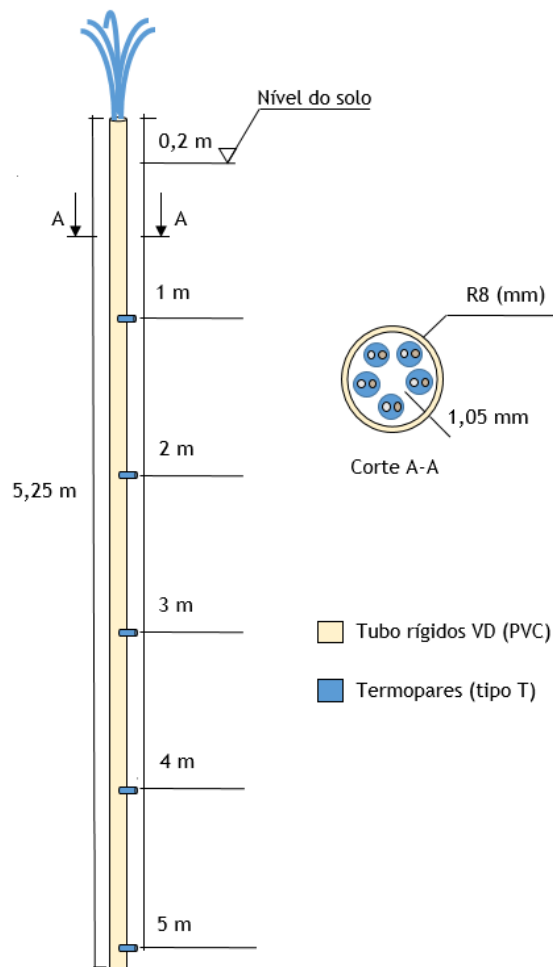


Figura 4.18 - Descrição e esquematização da sonda.

Foram empregues para cada sonda 20 metros (2 m, 3 m, 4 m, 5 m e 6 m) de fio termopar do tipo T (Omega Engineering Inc., PRT24), tendo-se dado uma margem de um metro para o seu acoplamento com o *data logger*, com intuito de possibilitar a leitura e registo dos cinco pontos de medição da temperatura em simultâneo. Os termopares utilizados são em Cobre - Constantan, os quais apresentam um revestimento constituído em polivinil (tipo *Rip Cord*). Quanto à junção dos condutores, esta foi realizada por fusão num banho de mercúrio no laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor (DEM - UBI).

Após a preparação dos termopares, estes foram inseridos nas respetivas guias. De modo a garantir que a junção de medida permanece perpendicular à guia, foram construídos uns apoios metálicos, os quais se encontram isolados dos condutores de forma a impedir qualquer influência nas medições da temperatura. A necessidade de construir este elemento deu-se, também, prevenindo no processo de implementação das sondas, aos alusivos locais, as forças exercidas sobre as junções bimetálicas dos termopares na reposição dos solos. Apresentam-se na figura 4.19 os pormenores referentes à incorporação de um dos apoios metálicos e a sua união ao termopar.



Figura 4.19 - Pormenores da aplicação de um apoio metálico.

4.2.3. Implementação das sondas

Após a construção das sondas de medição da temperatura do solo prosseguiu-se à sua implementação nos locais estipulados. As sondas encontram-se todas implementadas nas instalações da Universidade da Beira Interior (Covilhã - Portugal).

Pode observar-se na figura 4.20, assinalada por um círculo azul, a localização geográfica da primeira sonda a ser instalada. Esta situa-se a Sul da Faculdade de Engenharia junto ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) segundo as coordenadas GPS $40^{\circ} 16' 41''$ N $7^{\circ} 30' 46''$ W, a uma altitude de 662 metros. Para simplificar a sua designação ao longo do presente trabalho, esta localização foi definida como local B. Relativamente às outras duas sondas, ambas se situam junto à Reitoria da Universidade da Beira Interior, a Noroeste do edifício dos Serviços de Ação Social (SASUBI). Assinalado por um círculo vermelho, com as coordenadas GPS $40^{\circ} 16' 30''$ N $7^{\circ} 30' 38''$ W, encontra-se localizada, a uma altitude de 716 metros, a segunda sonda implementada, tendo sido definida esta localização como local C. Quanto à terceira sonda, apresenta-se indicada por um círculo amarelo, localizando-se a uma altitude de 711 metros e de acordo com as coordenadas GPS $40^{\circ} 16' 31''$ N $7^{\circ} 30' 37''$ W. Definida, por sua vez, como local D.



Figura 4.20 - Localização geográfica das três sondas implementadas.

Para efetuar os furos verticais para a colocação das respetivas sondas de medição da temperatura do solo aos 5 m de profundidade, utilizou-se de um penetrómetro de prospeção geotécnica e sondagem (PAGANI, TG-63/100), facultado pelo Laboratório de Geotecnia do DECA/UBI. Pode observar-se na figura 4.21 que este equipamento, de entre outros sistemas dinâmicos para ensaios geotécnicos, dispõe de um sistema de tração, neste caso lagartas, possibilitando a sua deslocação para o desejado local de furação.



Figura 4.21 - Equipamento PAGANI TG-63/100.

Para a realização dos três furos usou-se a mesma metodologia de trabalho. Primeiramente colocou-se o equipamento no local previsto para a realização dos furos, sendo este submetido a um procedimento de nivelamento através de um sistema de bolha incorporado no mesmo, o qual era ajustado por intermédio de três elementos de suporte hidráulicos articulados. Após o equipamento apresentar-se devidamente nivelado, foram acoplados ao mecanismo de rotação sete trados helicoidais de 0,75 m de comprimento e 0,06 m de diâmetro, por intermédio de cavilhas de fixação, de forma a atingir os 5 m de profundidade

Apresenta-se na figura 4.22 os componentes responsáveis pela calibração, controlo e furação do equipamento.



Figura 4.22 - Componentes e acessórios do PAGANI, TG-63/100.

Mediante o avanço em profundidade, realizado de modo contínuo e sem interrupções, quando a fundura do furo atingia, aproximadamente, 75% do comprimento do trado, era desligado o mecanismo de rotação de forma a ser acoplado um novo trado. Este procedimento repetia-se até atingir a profundidade desejada.

É de referir que a velocidade de penetração dos trados era ajustada de acordo com a natureza do solo e o aparecimento de rocha, entre os valores admissíveis do equipamento ($v_{\text{máx}} = 13$ cm/s).

Após concluída cada furação foram recolhidas amostras dos respectivos solos, as quais foram devidamente identificadas e armazenadas em ambiente resguardado, para posteriormente serem sujeitas a uma análise granulométrica para a identificação e caracterização aproximada dos solos representativos. Esta análise encontra-se apresentada na secção 2.5 da presente dissertação. Exibe-se na figura 4.23 uma fotografia relativa à recolha da amostra do solo A, respeitante ao primeiro solo a ser instalado uma sonda de monitorização da temperatura do solo.



Figura 4.23 - Fotografia relativa à recolha da amostra do solo A.

É possível visualizar na figura 4.24 fotografias relativas à conclusão da implementação das sondas de medição da temperatura do solo, segundo a ordem de instalação, depois da desmontagem e limpeza dos trados.



Figura 4.24 - Implementação das sondas nos respetivos locais.

4.3. Equipamentos auxiliares

Apresentadas as soluções, características e etapas adotadas para a construção e implementação dos elementos experimentais anteriormente apresentados, sucede-se, na subsecção seguinte, as especificações, mais relevantes, inerentes aos equipamentos auxiliares empregues para a concretização dos estudos experimentais realizados.

4.3.1. Sistema de ventilação

De modo a garantir um escoamento de ar unidirecional, contínuo e uniformemente distribuído, capaz de superar as diversas perdas de carga, essencialmente singulares, geradas pelas 24 curvas de 90°, optou-se em recorrer à utilização de um sistema de ventilação mecânica (S&P, TD-250/100 T), apresentado na figura 4.25.



Figura 4.25 - Ventilador TD-250/100 T (S&P).

Este ventilador é do tipo hélico-centrífugo, de baixo perfil, dispondo de um motor monofásico de apenas uma velocidade (2200 rpm), não regulável, alimentado diretamente a 230 V e 50 Hz de frequência, envolvendo uma potência elétrica máxima de 24 W e um caudal máximo de ar de 240 m³/h. Este ventilador envolve ainda uma proteção térmica, por fusível, que interrompe a alimentação do sistema quando este estiver sujeito a temperaturas de trabalho inferiores a - 20 °C ou superiores a 40 °C.

Na medida que o ventilador não permite proporcionar a regulação do seu caudal de ar, e uma vez que esse era um parâmetro que se desejava variar, optou-se em recorrer à integração em série de dois ventiladores com características idênticas. Na figura 4.26 é possível observar os detalhes referentes à incorporação dos dois ventiladores, nomeadamente à entrada e à saída do permutador de calor, sendo que para a diminuição do caudal de ar foi apenas incorporado um ventilador na conduta responsável pela admissão do ar.



Figura 4.26 - Fotografia de um dos ensaios realizados com dois ventiladores.

Embora os *datasheets* dos ventiladores fornecessem os dados relativos à sua potência elétrica, foram efetuadas medições da tensão e intensidades de corrente para cada um dos ensaios em que foi utilizado um, ou dois ventiladores. Os resultados obtidos demonstraram-se idênticos ao valor indicado pelo fabricante, nomeadamente 24 W para cada ventilador.

4.3.2. Sistema de medição da temperatura

Dado a necessidade da monitorização da temperatura em diversos pontos em simultâneo, recorreu-se um *data logger* de temperatura de 12 canais (PCE instruments, PCE-T 1200), apresentado na figura 4.27.

Este equipamento abarca uma vasta gama de tipos de termopares que lhe podem ser conectados (K, J, T, E, R, S). Embora os termopares empregues para as medições da temperatura do solo e da temperatura do ar ao longo do permutador de calor serem diferentes, nomeadamente tipo T e tipo K, respetivamente, este sistema de aquisição de dados possibilita com a mesma precisão, $\pm (0,4 \% + 0,5 \text{ }^\circ\text{C})$, a sua leitura.



Figura 4.27 - Data logger PCE-T 1200 (PCE instruments).

Este equipamento permite realizar medições *in situ*, facultando os valores de temperatura em tempo real, ou ainda, por intermédio de um cartão SD, o seu registo contínuo durante um período e intervalo de tempo pretendido, e, importar, posteriormente, os dados obtidos em formato de ficheiro Excel.

4.3.3. Escudo para sonda de medição da temperatura do ar exterior

Como sugerido por Tarara & Hoheisel (2007), para as medições da temperatura do ar ambiente foi construído um invólucro protetor, aplicado em torno da junção bimetálica do termopar. Exibem-se na figura 4.28 imagens referentes aos pormenores do invólucro contruído.

Este escudo tem como objetivo de minimizar os erros de medição causados pelas interferências geradas pelo ambiente externo, nomeadamente pela radiação solar, que incide sobre a junção de medição, e, pelas variações da velocidade do vento.

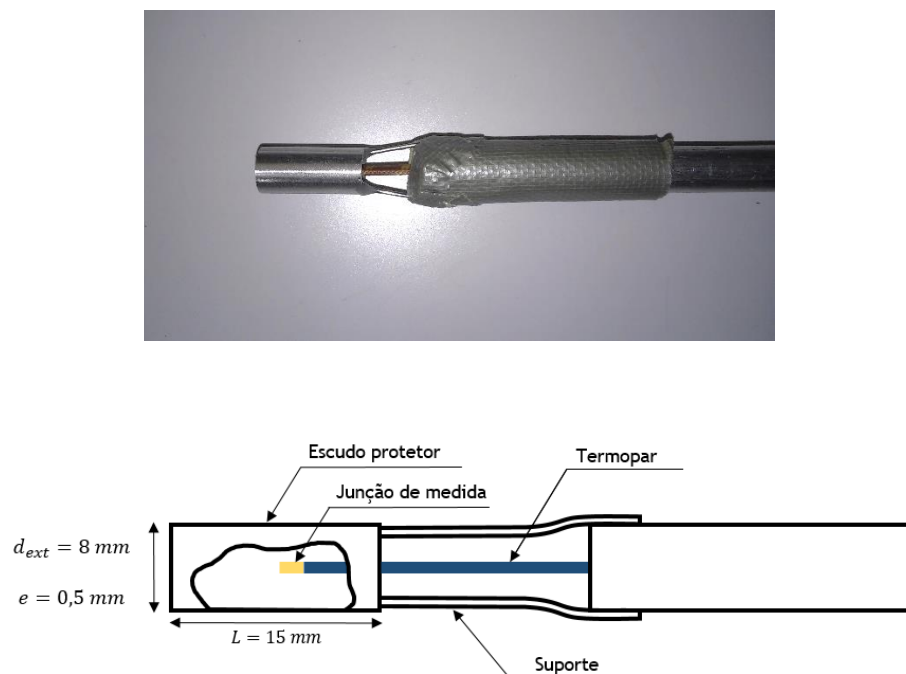


Figura 4.28 - Escudo para sonda de medição da temperatura do ar ambiente.

Como se pode observar na figura, a junção de medição encontra-se cercada por um cilindro de alumínio polido, posicionada convenientemente ao centróide do invólucro para impedir o seu contacto com a parede interna do invólucro o qual causaria erros de medição. As suas extremidades encontram-se abertas possibilitando o livre trânsito do ar (ventilação passiva), por forma a potencializar a transferência do calor para fora impedindo assim a geração de efeito de estufa. Como anteriormente referido, o material escolhido para o escudo foi alumínio, sendo que este foi polido, interior e exteriormente, de forma a proporcionar propriedades óticas que maximizam o seu poder de reflexão sobre a radiação térmica que incida na superfície.

Em consequência da baixa emissividade do material e das sugestões construtivas, as quais foram adotadas, indicadas por Tarara & Hoheisel (2007), o invólucro protetor permite facultar uma medição de temperatura do ar ambiente mais precisa e estável.

Para os ensaios experimentais a sonda de medição da temperatura do ar ambiente era disposta de modo que uma das aberturas do escudo e, conseqüentemente, a junção do par termoeletrico não permanecesse orientada diretamente segundo a mesma direção dos feixes de radiação solar incidentes.

4.3.4. Sistema de medição da velocidade

A medição da velocidade do escoamento de ar à saída do permutador de calor foi realizada através de um anemómetro de hélice (Testo, Testo 416), apresentado na figura 4.29. A precisão associada às medições do equipamento são de $\pm 0,2 \text{ m/s} + 1,5\%$ do valor médio da leitura efetuada.



Figura 4.29 - Anemómetro de hélice Testo 416.

Para a correta medição da velocidade do escoamento de ar construiu-se um suporte, tendo este como finalidade de garantir o posicionamento adequado do anemómetro, certificando-se que o rotor da turbina se localize no centro geométrico da secção transversal à saída da tubagem responsável pela extração de ar. Pode observar-se na figura 4.30 os pormenores relativos à associação do anemómetro com o suporte construído.

Quanto ao procedimento do registo das medições de velocidades do ar efetuadas, foram realizadas dez leituras durante um minuto, espaçadas de igual forma por seis segundos, cuja a média ponderada dos valores obtidos foi considerada como resultado final.

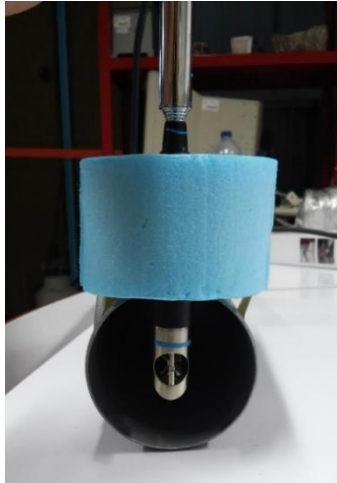


Figura 4.30 - Exemplificação do posicionamento do anemómetro através do suporte desenvolvido.

4.4. Nota conclusiva

No capítulo que agora se conclui foram apresentadas e caracterizadas todas as unidades experimentais que foram empregues para a realização dos ensaios experimentais efetuados no âmbito do presente trabalho. Inicialmente foram apresentados e justificados os parâmetros escolhidos para a conceção do permutador de calor ar-solo proposto, seguido pela descrição da metodologia empregue para a sua construção, referindo, concomitantemente, todos os materiais utilizados, e por fim, aludiu-se às etapas adotadas para a sua implementação. Posteriormente, foram apresentadas as sondas desenvolvidas para a medição da temperatura do solo, descrevendo-se, de igual forma, todos seus aspetos relativos à construção e implementação destas. O capítulo finaliza-se apresentando os equipamentos auxiliares utilizados para a realização dos diversos ensaios experimentais.

Apresentar-se-ão no capítulo seguinte os vários estudos realizados, expondo com detalhe as condições referentes a cada um dos ensaios experimentais efetuados para o permutador de calor e da monitorização da temperatura do solo realizadas. O capítulo 5 concluir-se-á com a apresentação e discussão dos resultados obtidos.

Capítulo 5

5. Estudo Experimental

Após a implementação das sondas de monitorização da temperatura do solo e do permutador de calor ar-solo proposto, cujos detalhes construtivos foram descritos no capítulo anterior, estes foram sujeitos a um estudo experimental em que a apresentação dos resultados obtidos se faz no capítulo que agora se segue. O estudo experimental referente às sondas de medição da temperatura do solo teve como propósito conhecer para cada localização, onde estas foram implementadas, o padrão da temperatura apresentada pelo solo em função da profundidade e do período analisado. Relativamente ao permutador de calor, o estudo experimental que lhe está associado teve como objetivo avaliar o seu desempenho global (térmico e energético).

5.1. Estudos realizados

Os estudos efetuados desenrolaram-se em diferentes localizações. Relativamente ao permutador de calor ar-solo, os ensaios realizaram-se na Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior junto ao edifício do *CFIUTE* (Centro de Formação Interação UBI Tecido Empresarial), designado no capítulo 4 como local A. Por sua vez, os ensaios referentes à monitorização da temperatura do solo foram realizados em três localizações distintas. Os ensaios concernentes à primeira sonda implementada, efetuaram-se na Faculdade de Engenharia da UBI junto ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), denominado como local B. Quanto às restantes duas sondas, os seus ensaios foram realizados nas instalações da Reitoria da Universidade da Beira Interior, tendo sido intitulados como local C e local D.

5.1.1. Monitorização da temperatura do solo

Com o propósito de analisar a variação da temperatura do solo, metro a metro até aos 5 metros de profundidade, nas localizações B, C e D, foram realizados dois tipos ensaios, designados por ensaios do tipo S e do tipo D. Estes diferenciam-se pelos períodos em que essas variações foram estudadas, tendo como finalidade conhecer os ciclos diários (tipo D), uma vez que se realizaram vários ensaios desta natureza, e o ciclo “sazonal” (tipo S) de cada localização.

Os ensaios do tipo S consistiram na monitorização semanal da temperatura do solo e da temperatura medida no exterior nas três localizações. Os registos dos dados iniciaram-se em cada localização nas segundas-feiras após a implementação de cada sonda e docorreram até ao dia 3 de outubro de 2016. A primeira sonda foi implementada no local B em meados do mês de dezembro de 2015, por sua vez a segunda sonda foi instalada no local C no início de fevereiro de 2016 e, por fim, a última sonda foi implementada no início do mês de abril de 2016 no local D. As medições da temperatura do solo nas três localizações foram realizadas sempre junto às

12:00. É de referir que para o registo das temperaturas dos respetivos solos eram esperados cerca de 2 a 3 minutos, com o objetivo de aguardar a estabilização dos valores após a ligação dos termopares ao *data logger*.

Pretendeu-se com estes ensaios estudar, mediante os períodos analisados para as três localizações, o padrão da temperatura do solo à profundidade de 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, e 5 m, comparando as dissemelhanças exibidas entre cada solo e analisando a viabilidade de cada solo para a sua exploração como fonte de arrefecimento e/ou aquecimento. Foram igualmente registadas as temperaturas exteriores.

Relativamente aos ensaios do tipo D, estes consistiram na monitorização da temperatura do solo e da temperatura no exterior nas três localizações, nas mesmas profundidades referidas anteriormente, durante períodos de 24 horas. Estes ensaios tiveram como finalidade analisar os efeitos do aquecimento diurno e do arrefecimento noturno na temperatura do solo mediante o avanço em profundidade, e eventualmente comparar as diferenças apresentadas entre cada localização. As medições da temperatura do solo e da respetiva temperatura exterior foram realizadas através do *data logger* (PCE-T 1200), tendo sido este programado para o registo dos dados em intervalos de tempo de 10 minutos.

Na totalidade foram realizados sete ensaios, sendo estes repartidos em três para o local B, dois para o local C e os restantes dois para o local D. As datas em que os ensaios foram realizados tiveram o intuito de analisar as condições apresentadas em período de inverno, nomeadamente em fevereiro, tendo sido apenas realizado um ensaio para o local B, uma vez que as outras duas sondas ainda não se encontravam implementadas. Ainda assim, foram realizados ensaios para o período de verão, sendo que neste caso foram efetuados ensaios em finais de junho e agosto para todas as localizações. Para além do 1º ensaio efetuado para o local B, os restantes ensaios experimentais realizados em período de junho foram realizados em dias consecutivos entre cada localização, de igual forma aos ensaios feitos em período de agosto, como se pode visualizar na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Data da monitorização da temperatura do solo ao longo de 24 horas nas localizações B, C e D.

	Ensaio	Data
Local B	1	02/02/2016 - 03/02/2016
	2	20/06/2016 - 21/06/2016
	3	22/08/2016 - 23/08/2016
Local C	1	21/06/2016 - 22/06/2016
	2	24/08/2016 - 25/08/2016
Local D	1	22/06/2016 - 23/06/2016
	2	23/08/2016 - 24/08/2016

Através da realização destes ensaios, pretendeu-se analisar os efeitos do aquecimento (período diurno) e arrefecimento (período noturno) do solo no padrão da sua temperatura nas cinco profundidades consideradas e confrontar, portanto, as dissemelhanças apresentadas ao longo dos vários ensaios realizados, e entre cada localização.

5.1.2. Permutador de calor ar-solo

Para analisar o desempenho térmico e energético do permutador de calor foram efetuados doze ensaios experimentais, distribuídos desde meados de março até final do mês de agosto. Foram realizados ensaios com caudais de ar distintos cujo objetivo foi de analisar o efeito da variação deste parâmetro no desempenho do permutador. Nesse sentido, foram efetuados sete ensaios em que foi utilizado um caudal de ar de 27,9 m³/h e os restantes cinco com um caudal de 53,1 m³/h. Apresentam-se na tabela 5.2 os caudais volumétricos associados a cada ensaio e a respetiva data da sua concretização.

Todos os ensaios realizados basearam-se na monitorização, por um período de 24 horas, da temperatura do ar medida no exterior, assumida como temperatura do ar à entrada do permutador de calor, e da temperatura do ar ao longo das localizações A, B, C, D e E do permutador, ilustrados na figura 4.6 do capítulo 4 da presente dissertação. Para o registo dessas temperaturas foi utilizado o *data logger* (PCE-T 1200), tendo sido este programado para o registo das respetivas temperaturas em intervalos de tempo de 10 minutos.

Para os ensaios envolvendo um caudal de ar de 27,9 m³/h, foi apenas empregue um ventilador (S&P, TD-250/100 T) associado à boca de admissão de ar do permutador de calor. Para aumentar o caudal de ar para 53,1 m³/h, recorreu-se à integração suplementar de outro ventilador de características idênticas, sendo que este foi acoplado à boca de saída de ar do permutador. Nesse sentido, é de referir que os ensaios em que se variou o caudal de ar de 27,9 m³/h para 51,3 m³/h foram realizados em dias consecutivos, de forma que as condições exteriores fossem as mais semelhantes quanto possível. Sempre que essas condições se alteraram com significado esse ensaio não era considerado.

Observa-se pela tabela 5.2 que cada um dos doze ensaios experimentais realizados se desenrolou por dois dias, devendo-se ao facto de estes não terem sido iniciados às 00:00. À vista disso, os dados que serão apresentados na secção seguinte, relativo aos resultados obtidos do permutador de calor ao longo do tempo, fazem referência a um período entre 00:00 e 00:00 (24 horas), sendo que os resultados serão alusivos a junção dos dados obtidos entre os respetivos dias dos ensaios realizados.

Tabela 5.2 - Caudal de ar e data associada a cada ensaio.

Ensaio	Caudal volumétrico [m ³ /h]		Data
	27,9	53,1	
1	x		19/05/2016 - 20/05/2016
2	x		01/06/2016 - 02/06/2016
3		x	02/06/2016 - 03/06/2016
4	x		07/06/2016 - 08/06/2016
5		x	08/06/2016 - 09/06/2016
6	x		29/06/2016 - 30/06/2016
7		x	30/06/2016 - 01/07/2016
8	x		08/07/2016 - 09/07/2016
9	x		25/07/2016 - 26/07/2016
10		x	28/07/2016 - 29/07/2016
11	x		29/08/2016 - 30/08/2016
12		x	30/08/2016 - 31/08/2016

Entre os ensaios experimentais 8 e 9, tinha sido realizado um ensaio com um caudal 51,3 m³/h, com o objetivo de agir como ensaio comparativo com o ensaio 8, porém os resultados obtidos não foram considerados uma vez que quando se chegou ao local o ventilador encontrava-se desligado.

Estes ensaios visaram dois tipos de análises, a primeira propõe estudar o efeito no avanço no tempo, ou seja, do aquecimento do solo mediante o decorrer do período de verão, no desempenho térmico e energético do permutador de calor proposto. Por sua vez, a segunda análise visa avaliar o efeito da variação do caudal volumétrico face, de igual forma, ao desempenho conseguido pelo permutador.

5.2. Resultados e discussão

Com a apresentação dos resultados que agora se inicia, pretende-se numa primeira parte dar a conhecer e comparar o comportamento das temperaturas dos solos nas três localizações analisadas a partir dos valores obtidos pelas medições experimentais realizadas semanalmente e por períodos de 24 horas. Na segunda parte são abordados os resultados obtidos referentes ao permutador de calor ar-solo, tendo como objetivo dar a conhecer, para o período de arrefecimento, a sua viabilidade aplicativa a partir dos resultados obtidos experimentalmente das diferenças de temperatura ($T_{Amb} - T_E$), potência de arrefecimento e coeficiente de desempenho (*COP*) em função das condições aplicadas (período de funcionamento e/ou caudal volumétrico).

5.2.1. Monitorização da temperatura do solo

Dos dados recolhidos referentes aos ensaios do tipo S e do tipo D, apresentam-se nas subsecções que se seguem a variação da temperatura medida no exterior e do solo nos locais B, C e D, respetivamente, ao longo dos períodos analisados.

5.2.1.1. Monitorização semanal da temperatura do solo no local B

Apresentam-se na figura 5.1 os dados obtidos semanalmente da temperatura do ar medida no exterior (Ambiente) e do solo, metro a metro, até os 5 metros de profundidade referente ao local B.

Pela observação do gráfico é possível visualizar três períodos, nomeadamente o período que retrata a época de inverno, o período referente à mudança de estação (primavera) e o período alusivo à época de verão. No primeiro período, entre 14 de dezembro de 2015 e 18 de abril de 2016, o que observamos é que a temperatura do solo se revela mais alta que do que a temperatura medida no exterior, embora em determinados momentos tal não se verifique para a profundidade de 2 metros e, de forma mais pronunciada, para profundidade de 1 metro. Apesar disso, comprova-se que o solo pode ser, assim, utilizado como fonte de aquecimento.

Com a entrada da nova estação (primavera), o que se verifica é que ocorre uma inversão da temperatura do solo em consequência do aumento da temperatura no exterior. Observa-se que esta alteração é realizada de forma gradual, no sentido de que a temperatura do solo tende a sofrer um aumento mais tardio com o aumento da profundidade, fruto da inércia térmica do solo. À vista disso, verifica-se que a temperatura do solo, nomeadamente a 5 metros de profundidade, se manteve num valor relativamente próximo daquele que possuía e, portanto, deixou de se encontrar a uma temperatura mais elevada que a temperatura exterior e passando para uma situação em que o solo se encontra mais frio que o exterior durante todo o período verão. Nesse sentido, contata-se, por sua vez, que o solo revela a capacidade de ser explorado como fonte de arrefecimento.

Nos finais do mês de setembro é possível ainda observar o começo de uma nova inversão da temperatura do solo, como consequência do seu arrefecimento provocado pela vinda do outono. Verifica-se que enquanto o solo nas suas profundidades mais afastadas da superfície, apresenta ainda uma tendência de aumento da sua temperatura, constata-se um comportamento contraditório apresentada pela temperatura medida a 1 metro de profundidade. Prevê-se que, à semelhança do sucedido no primeiro período, que o solo venha a apresentar uma temperatura mais elevada à verificada no exterior.

Observa-se adicionalmente que no período de inverno a temperatura do solo foi diminuindo, nomeadamente em todas as profundidades analisadas, sendo que a partir do momento em que a temperatura exterior tomou valores muito superiores à temperatura do solo, este começou a

aquecer de forma mais expressiva para as profundidades mais superficiais, mas muito paulatinamente para as camadas mais profundas do solo.

Ao longo de todo o período analisado visualiza-se ainda que, na generalidade, foram sentidas variações elevadas da temperatura medida no exterior entre períodos de uma semana, verificando-se que o solo demorou a acompanhar estas atualizações sucedendo a atrasos na resposta a essas mudanças. A título de exemplo, entre 21 de dezembro de 2015 e 11 de janeiro de 2016, observa-se que perante uma descida da temperatura medida no exterior, o solo tendeu apenas sentir esse efeito na sua temperatura na semana posterior, de forma semelhante se constata quando a temperatura ambiente apresenta um aumento significativo. Embora essas tendências sejam notórias ao fim de uma semana, este fenómeno é gerado gradualmente ao longo da semana, sendo que a variação dos picos apresentado pelo solo vai em conta com os dias sucessivos com que a temperatura ambiente persistiu a tais valores e entre outros fatores relativos as condições exteriores verificadas entre esse período, como por exemplo a pluviosidade.

A figura 5.2 exhibe com mais clareza os efeitos provocados pelo aquecimento e arrefecimento do solo, entre 14 de dezembro de 2015 e 3 de outubro 2016, em função do aumento da profundidade. É de referir antes de tudo, que a profundidade considerada como '0' faz referência à temperatura medida no exterior. Verifica-se, assim, que em virtude da inércia térmica do solo ocorre um decréscimo da amplitude térmica com o avanço em profundidade. Observa-se que o solo a 5 metros de profundidade apresenta um ambiente térmico mais estável, expondo variações de temperaturas menos significativas daquelas constatadas às profundidades mais próximas da superfície, as quais revelam uma maior tendência de se aproximar das amplitudes térmicas sentidas em ambiente exterior.

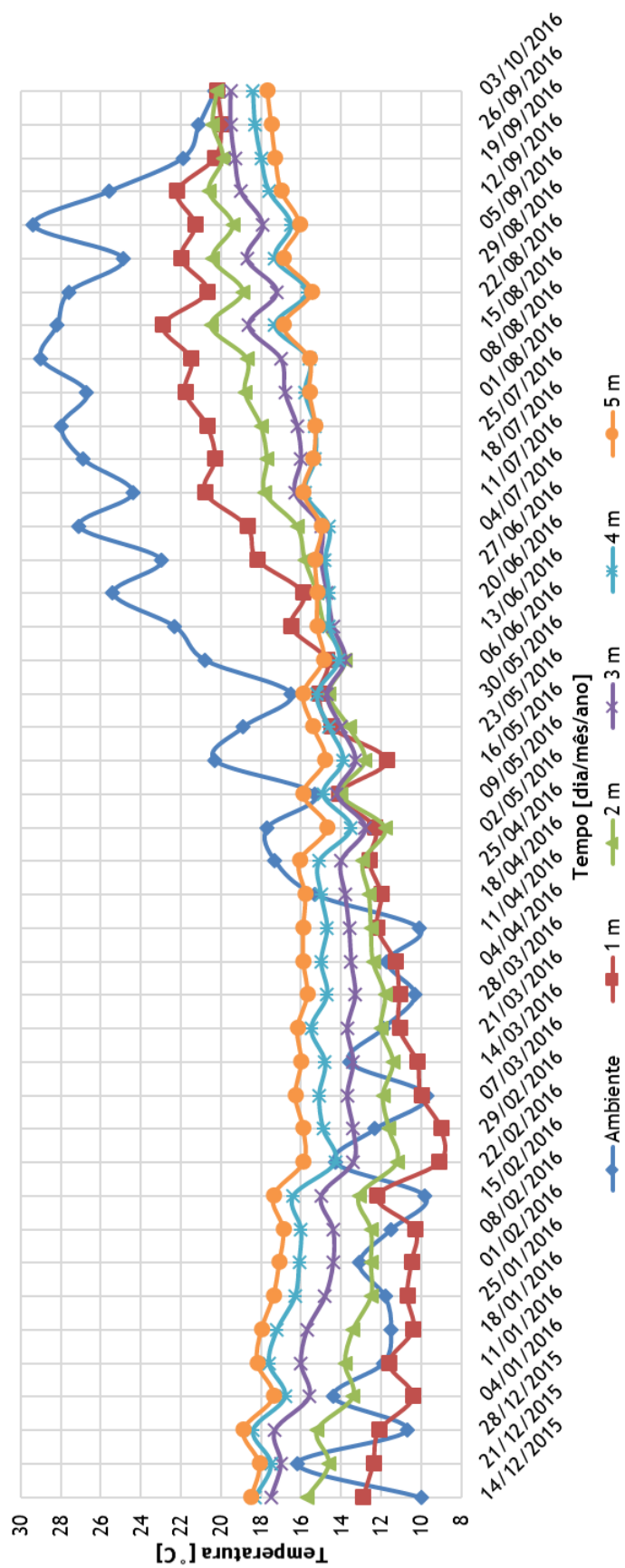


Figura 5.1 - Padrão da temperatura do solo e da temperatura medida no exterior do local B entre 14 de dezembro de 2015 e 3 de outubro de 2016.



Figura 5.2 - Amplitude térmica do local B entre 14 de dezembro de 2015 e 3 de outubro de 2016.

Na tabela 5.3 encontram-se sumarizadas as amplitudes térmicas registadas, assim como, a temperatura máxima, mínima e média do solo nas várias profundidades consideradas e da temperatura exterior no local B. Da análise da tabela conclui-se, a título de exemplo, que a 5 metros de profundidade o solo apresentou uma variação de temperatura de apenas 4,2 °C enquanto a 1 metro de profundidade se registou uma amplitude térmica de 13,9 °C. Pode concluir-se ainda que, com o aumento da profundidade, o solo encaminha-se a apresentar uma temperatura média que tende a aproximar-se à temperatura média anual registada no exterior, o que realça a afirmação de Khabbaz et al. (2016).

Tabela 5.3 - Sinopse da temperatura medida no exterior e da temperatura do solo no local B desde de 14 de dezembro de 2015 a 3 de outubro de 2016.

Profundidade [m]	Temperatura [°C]			
	Máxima	Mínima	Média	Amplitude térmica
Sonda exterior	29,4	9,7	18,3	19,7
1	22,9	9,0	15,0	13,9
2	20,6	11,2	15,1	9,4
3	19,5	12,8	15,5	6,7
4	18,4	13,5	15,8	4,9
5	18,9	14,7	16,3	4,2

5.2.1.2. Monitorização semanal da temperatura do solo no local C

Exibem-se na figura 5.3 os dados obtidos semanalmente da temperatura exterior e do solo, metro a metro, até os 5 metros de profundidade referente ao local C.

Apesar da monitorização do solo do local C ter-se iniciado 12 semanas após a monitorização no local B, é possível ainda visualizar no gráfico os respetivos três períodos característicos do solo, os quais se referem ao período de inverno, primavera e verão. No primeiro período, nomeadamente entre 8 de fevereiro e 11 de abril, o que se observa é que o solo se revela ligeiramente mais quente que o ambiente exterior, com algumas exceções apresentadas em determinados momentos em que a temperatura exterior assumiu valores iguais ou até mesmo superiores à temperatura apresentada pelo solo a 5 metros de profundidade. É de realçar que a monitorização do solo foi efectuada num período do dia em que a temperatura exterior se revela mais elevada (12:00), sendo previsível que a temperatura do solo no término do período diurno, em que as necessidades de aquecimento são mais requeridas, apresente uma maior discrepância, podendo assim ser explorada como fonte de aquecimento.

À semelhança do sucedido para o local B, verifica-se com a vinda da primavera uma inversão das temperaturas apresentadas pelas profundidades de 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, e 5 m. As profundidades mais superficiais, que no período de inverno evidenciaram temperaturas mais baixas, revelam-se aquelas que demonstram um aumento mais expressivo da sua temperatura, uma vez que se encontram mais propícias às alterações das condições exteriores. Fruto da

inércia térmica do solo, observa-se que a temperatura a 4 e 5 metros de profundidade tendem a sofrer um aumento mais tardio, permanecendo, contudo, numa gama de valores reduzida. Nesse sentido, o solo apresentou, com grande diferença, valores de temperatura inferiores às constatadas pela temperatura medida no exterior em período de verão, mostrando-se, assim, bastante promissor como fonte de arrefecimento.

Verifica-se, ainda, que a partir do início de setembro a temperatura do solo apresenta uma ligeira tendência em diminuir, particularmente visível à profundidade de 1 metro. Dos últimos valores registados da temperatura do solo, prevê-se que o solo venha exibir uma temperatura mais elevada à verificada no exterior.

Como observação final ao gráfico da figura 5.3, é possível visualizar complementarmente a ocorrência de um atraso da resposta da temperatura do solo face às oscilações semanais da temperatura medida no exterior. Por exemplo, entre o período de 22 de agosto e 12 de setembro, verificou-se uma descida substancial da temperatura medida no exterior, sendo que a temperatura do solo apenas apresentou essa tendência na semana seguinte. Similarmente, mas de forma inversa, este efeito se constatou quando a temperatura medida no exterior aumentou significativamente.

Através da figura 5.4 é possível comprovar mais uma vez a mitigação dos efeitos de aquecimento e arrefecimento do solo na variação da temperatura com o avanço da profundidade. Visualiza-se que à medida que nos afastamos da superfície, a amplitude térmica que se sentiu desde de 8 de fevereiro de 2016 e 3 de outubro de 2016 é atenuada em consequência da inércia térmica do solo, observando-se que o solo a 5 metros de profundidade proporciona variações de temperaturas inferiores às verificadas nas profundidades mais superficiais.

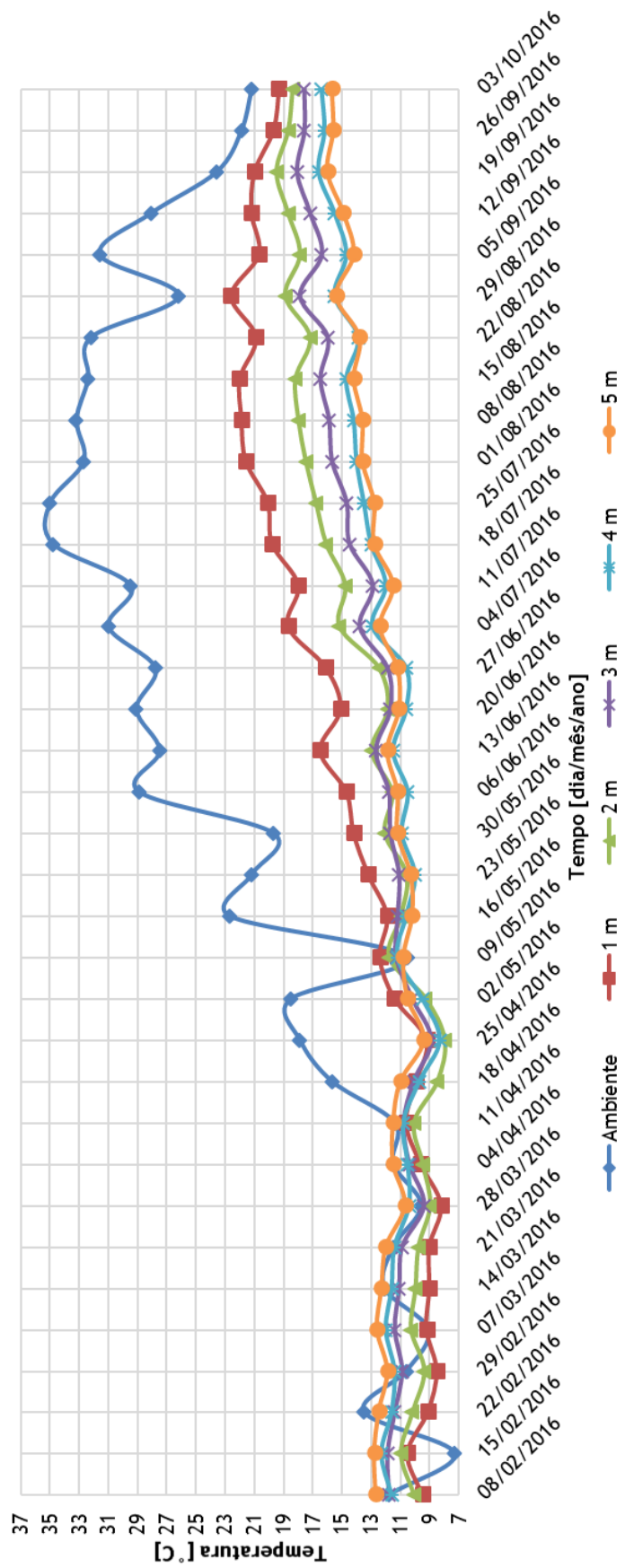


Figura 5.3 - Padrão da temperatura do solo e da temperatura medida no exterior do local C entre 8 de fevereiro e 3 de outubro de 2016.

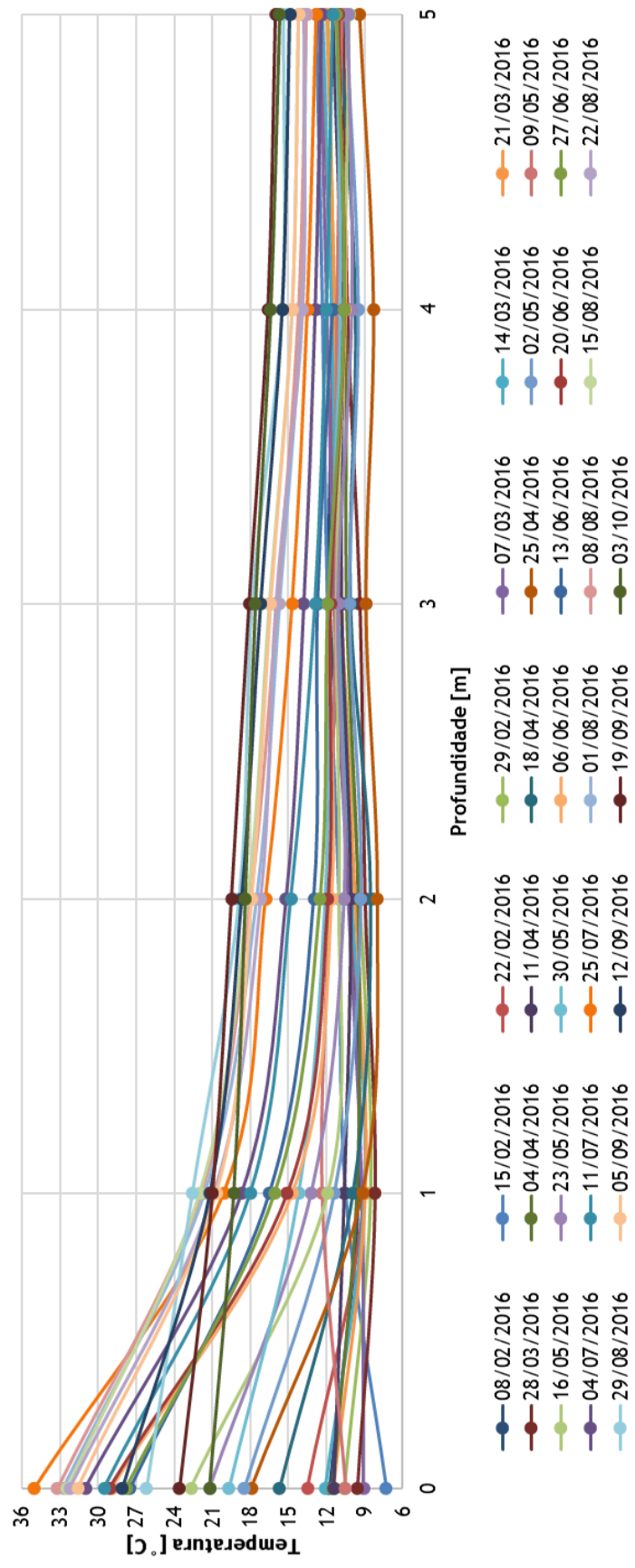


Figura 5.4 - Amplitude térmica do local C entre 8 de fevereiro e 3 de outubro de 2016.

Apresentam-se na tabela 5.4 os valores obtidos da temperatura máxima, mínima e média do solo nas várias profundidades consideradas, e da temperatura medida no exterior relativos ao local C. Observa-se efetivamente que a amplitude térmica verificada a 5 metros de profundidade do solo revelou-se mais reduzida, tendo-se verificado durante período analisado um valor 6,6 °C enquanto a 2 metros mostrou uma amplitude térmica de 11,5 °C.

Tabela 5.4 - Sinopse da temperatura medida no exterior e da temperatura do solo no local C desde de 8 de fevereiro de 2016 a 3 de outubro de 2016

Profundidade [m]	Temperatura [°C]			
	Máxima	Mínima	Média	Amplitude térmica
Sonda exterior	30,0	7,3	21,8	27,7
1	22,6	8,2	15,0	14,4
2	19,5	8,0	13,2	11,5
3	18,1	8,9	13,1	9,2
4	16,6	8,3	12,3	8,3
5	16,0	9,4	12,5	6,6

5.2.1.3. Monitorização semanal da temperatura do solo no local D

Apresentam-se na figura 5.5 os dados obtidos semanalmente da temperatura exterior e do solo, metro a metro, até os 5 metros de profundidade relativo ao local D.

Uma vez que nesta localização a monitorização da temperatura do solo e da temperatura exterior se iniciou apenas em abril, só se é possível observar no gráfico o período referente à mudança de estação (primavera) e ao período de verão. Das primeiras medições efetuadas, constata-se que o solo já se encontrava a uma temperatura mais baixa do que a temperatura medida no exterior, à exceção de eventuais momentos. Além disso, visualiza-se que o solo neste primeiro período já se encontrava submetido a uma inversão das temperaturas entre as profundidades analisadas, em consequência do seu aquecimento (primavera).

Embora se verifique uma tendência de aumento da temperatura do solo mediante o decorrer do período de verão, que se denuncia claramente muito pouco significativa para as profundidades de 4 e 5 metros, observa-se que desde do dia 9 de maio, o solo permaneceu, nas cinco profundidades monitorizadas, a uma temperatura mais baixa que a temperatura registada no exterior. À vista desse facto, confirma-se que o solo nesta localização revela temperaturas adequadas, por exemplo, para o arrefecimento do ar interior de edifícios.

Com a entrada do outono visualiza-se o início de uma nova inversão das temperaturas do solo. Das últimas medições realizadas observa-se ainda uma tendência de aumento da temperatura para as profundidades de 3, 4 e 5 metros, enquanto as restantes já atingiram o seu pico de temperatura máxima e tendem a acompanhar a diminuição da temperatura medida no exterior.

Observa-se, novamente, no gráfico a ocorrência de um atraso da resposta da temperatura do solo face às oscilações semanais da temperatura medida no exterior. A título exemplificativo é fenómeno pode ser visualizado entre o período de 2 e 16 de maio.

Através da análise da figura 5.6 observa-se, mais uma vez, que à medida que se avança na profundidade, a amplitude térmica, que neste caso se registou desde de 11 de abril e 3 de outubro de 2016, foi diminuindo. À vista disso, verifica-se que o solo a 5 metros de profundidade revelou-se o que apresentou um ambiente térmico mais estável, fruto da inércia térmica do solo.

Apresentam-se na tabela 5.5 os valores da temperatura máxima, mínima, média e das alusivas amplitudes térmicas registadas nas várias profundidades consideradas, assim como, da temperatura medida no exterior para o local D durante o período analisado. Dos valores apresentados verifica-se que, a título de exemplo, a 5 metros de profundidade o solo apresentou uma amplitude térmica de 5,3 °C enquanto a 1 metro se registou uma variação da temperatura de 15,5 °C.

Tabela 5.5 - Sinopse da temperatura medida no exterior e da temperatura do solo no local D desde de 11 de abril de 2016 e 3 de outubro de 2016.

Profundidade [m]	Temperatura [°C]			
	Máxima	Mínima	Média	Amplitude térmica
Sonda exterior	33,4	11,4	24,5	22,0
1	26,6	11,1	19,7	15,5
2	22,8	9,8	17,0	13,0
3	20,2	10,5	15,3	9,7
4	17,0	10,1	12,8	6,9
5	16,0	10,7	12,7	5,3

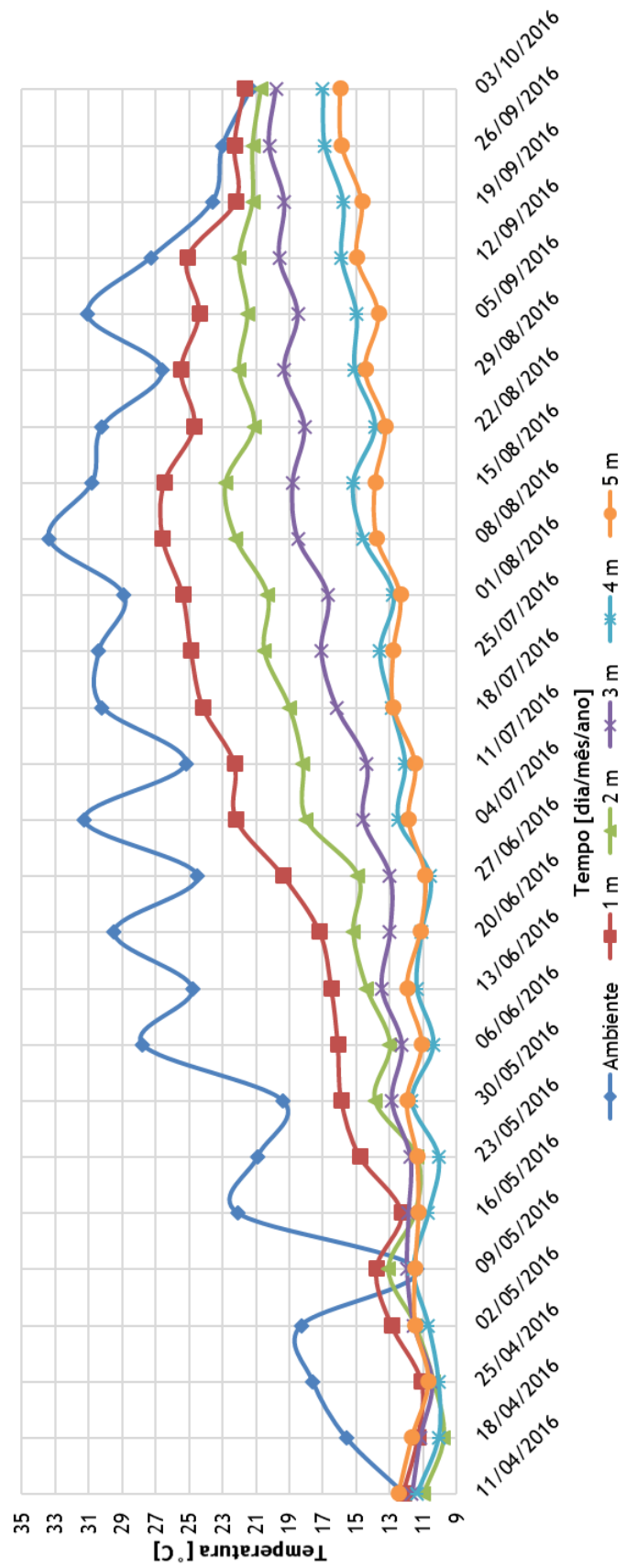


Figura 5.5 - Padrão da temperatura do solo e da temperatura medida no exterior do local C entre 11 de abril e 3 de outubro de 2016.

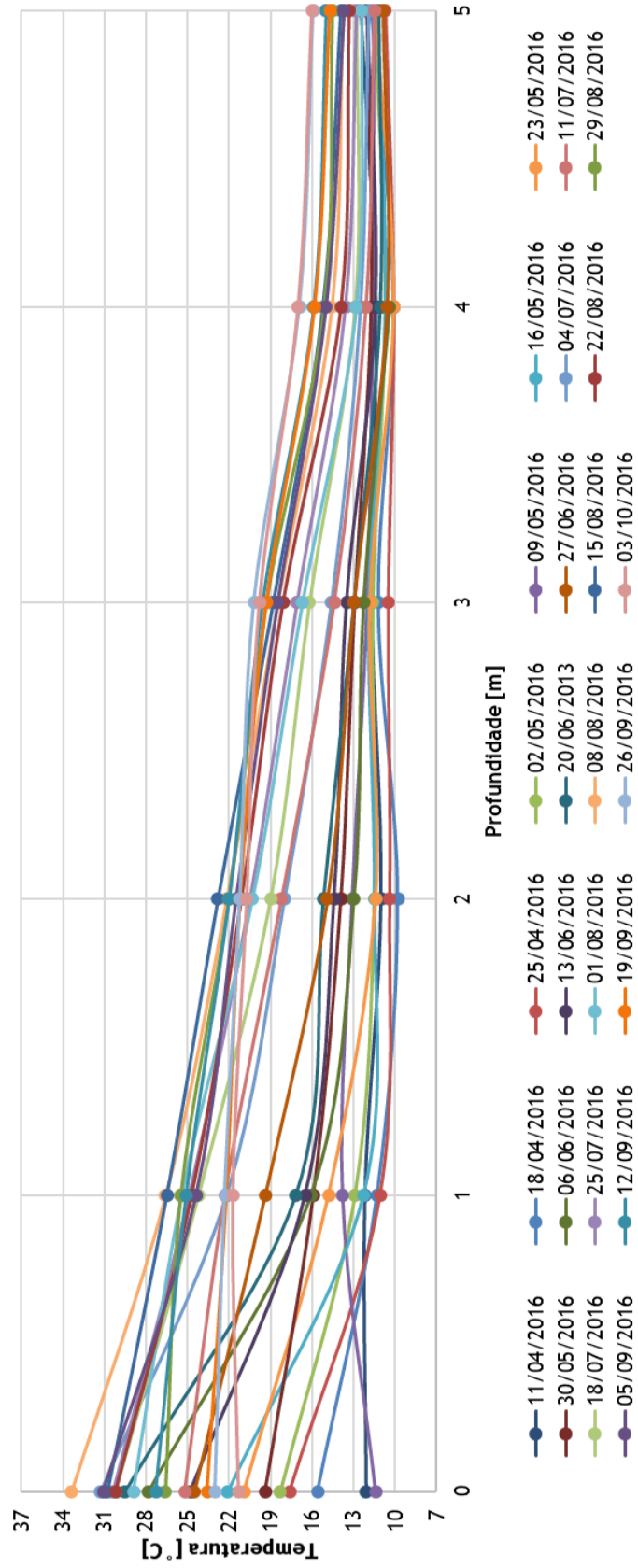


Figura 5.6 - Amplitude térmica do local C entre 11 de abril e 3 de outubro de 2016.

5.2.1.4. Análise comparativa das três localizações

Dos resultados apresentados para as três localizações, aquilo que se conclui comparativamente é que se evidenciam algumas diferenças, não em termos de tendência, mas sim nos valores apresentados nas profundidades analisadas. O que se constata é que ainda que as localizações se enquadrem relativamente próximas geograficamente e que os resultados das respetivas análises granulométricas tenham emitido resultados aproximadamente semelhantes, os solos encontram-se efetivamente a temperaturas diferentes, o que não será de desprezar.

Podem-se enunciar alguns fatores oriundos destas dissemelhanças, como por exemplo a diferença de altitudes apresentadas entre cada localização, a composição mineralógica e o conteúdo de água que os solos contêm, visto estes últimos constituírem fatores que afetam as propriedades térmicas dos solos e, por consequência, o seu comportamento face à transferência de calor. É de mencionar ainda que as análises granulométricas fazem apenas referência a uma amostra de solo, fornecendo meramente uma aproximação da composição granulométrica do solo representativo.

Como observação final, verificou-se que mesmo perante um período de monitorização mais extenso, o local B evidenciou amplitudes térmicas mais reduzidas. Este facto pode ser justificado na medida que a sonda foi implementada numa localização onde se encontrava constantemente sombreada por vegetação, ao contrário do verificado nas outras localizações onde as restantes duas sondas se encontram instaladas.

5.2.2. Monitorização da temperatura do solo ao longo de 24 horas

Apresentam-se de seguida os dados obtidos, para as três localizações, relativos aos ensaios que se efetuaram para a monitorização da temperatura medida no exterior e do solo para um período de 24 horas. O gráfico da figura 5.7 diz respeito ao local B correspondente ao 1º ensaio realizado no início de fevereiro. Por sua vez, o gráfico da figura 5.8 é relativo ao local C para o 1º ensaio efetuado em finais de junho e, por fim, a figura 5.9 faz referência ao local D para o 2º ensaio realizado em finais de agosto.

Observa-se no conjunto dos gráficos a variação da temperatura medida no exterior ao longo dos respetivos períodos de 24 horas, onde se visualizam os picos de temperatura máxima a ocorrerem entre o período das 12:00 e das 18:00, e os valores de temperatura mínima a sucederem entre o término do período noturno e do início do dia, nomeadamente entre as 6h30 e as 8h30. Da análise dos gráficos, verifica-se que independentemente destas oscilações diárias da temperatura medida no exterior, a temperatura do solo, em todas as profundidades consideradas, mantém-se praticamente constante. Nesse sentido, conclui-se que os efeitos do aquecimento e o arrefecimento do solo, gerado pelos respetivos períodos diurnos e noturno, não penetraram à profundidade de 1 metro, o que confirma as observações feitas por Farouki (1981). É de referir, ainda, que esta tendência é extensiva aos sete ensaios do tipo D realizados.

Adicionalmente, uma vez que os ensaios foram realizados em datas diferentes, observa-se que em função da data em que foram realizados estes ensaios, a temperatura do solo apresentou-se, na generalidade, mais elevada relativamente a temperatura medida no exterior, para o 1º ensaio realizado no local B no início de fevereiro, e mais baixa para o 1º ensaio e o 2º ensaio realizados no local C e D.

Verifica-se na figura 5.7 o aparecimento de picos de temperatura no período entre as 12:00 e as 16h30, os quais poderiam ser justificados pelo aumento substancial da temperatura medida no exterior, no entanto este fenómeno não se verificou nos restantes ensaios do tipo D realizados no local B em que nestes casos a temperatura ambiente se observou muito superior. À vista disso, prevê-se que este fenómeno tenha sido origem de algum erro no registo dos dados realizado pelo *data logger*. Além disso, observa-se nas figuras 5.8 e 5.9 que os valores da temperatura medida no exterior apresentam alguma excessividade, embora as temperaturas apresentadas durante estes dias terem-se verificadas bastante elevadas. Apesar da utilização do escudo protetor, cujos detalhes construtivos foram descritos no capítulo anterior, não conseguiu mesmo assim garantir a medição correta pelo termopar.

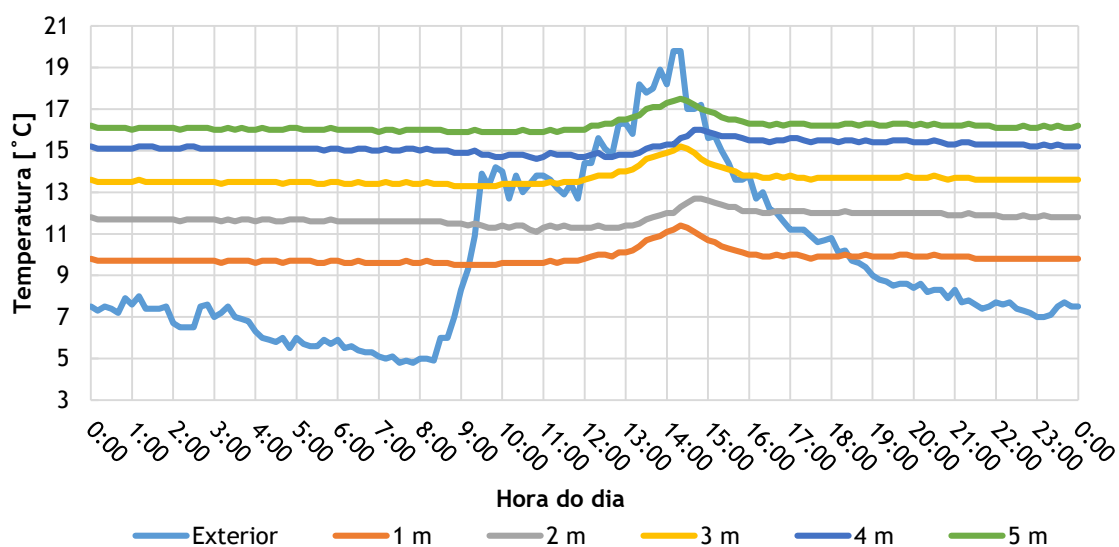


Figura 5.7 - Variação da temperatura exterior e do solo no local B entre o dia 2 e 3 de fevereiro de 2016.

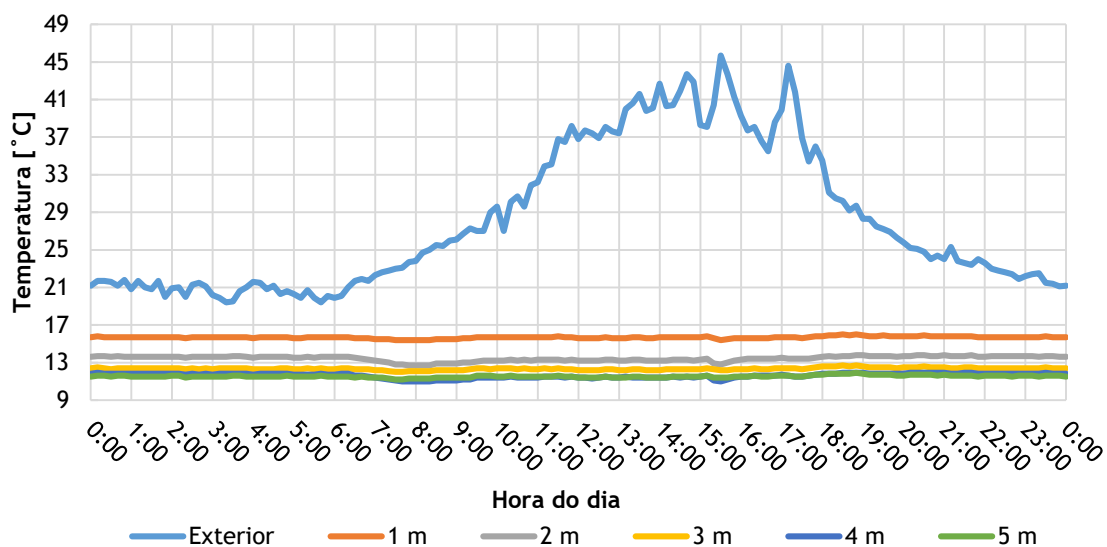


Figura 5.9 - Variação da temperatura exterior e do solo no local C entre o dia 21 e 22 de junho de 2016.

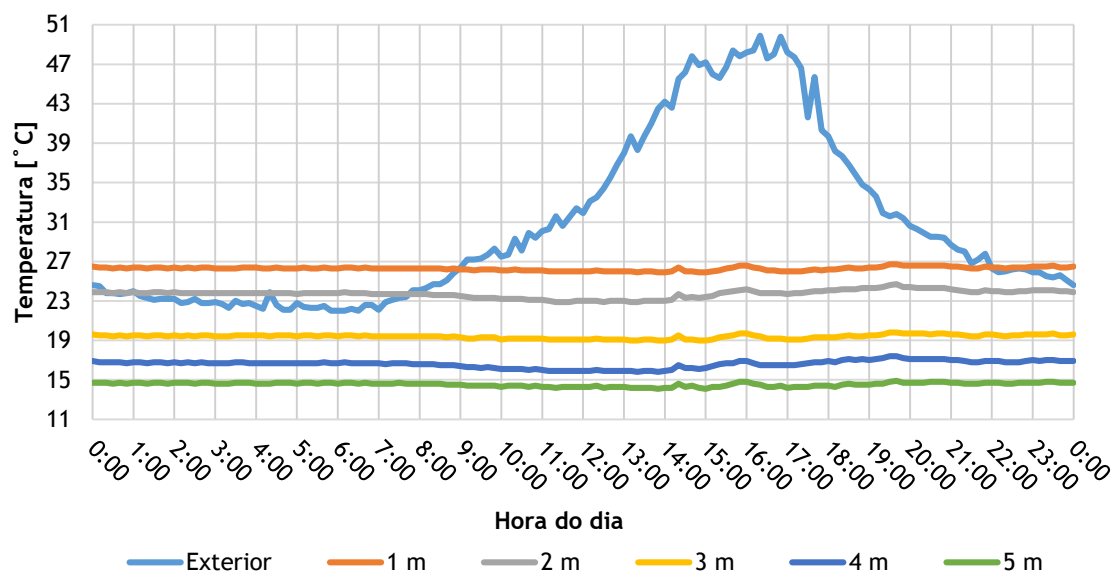


Figura 5.8 - Variação da temperatura exterior e do solo no local D entre o dia 23 e 24 de agosto de 2016.

5.2.3. Permutador de calor ar-solo

Com os dados recolhidos relativos à temperatura medida no exterior e do ar ao longo do permutador durante o seu estudo experimental, estudo que contemplou a realização de 12 ensaios de duração de 24 horas distribuídos ao longo do período de verão (desde de finais de maio até finais de agosto), tornou-se possível a determinação da diferença de temperatura ($T_{amb}-T_E$) conseguida por este, assim como, da sua potência de arrefecimento e do seu COP (Coeficiente de Desempenho), em termos instantâneos, tendo em conta as condições exteriores (data do ensaio) e a variação do caudal do ar.

5.2.3.1. Variação da temperatura do ar no permutador ao longo de 24 horas

Nos gráficos que se seguem podem-se observar a variação da temperatura medida no exterior e da temperatura do ar monitorizada nas localizações A, B, C, D e E do permutador de calor ar-solo.

Dos 12 ensaios realizados, em que foram registadas as temperaturas em intervalos de tempo de 10 minutos, exibem-se nas figuras 5.10 e 5.11 os dados relativos a dois destes ensaios. O primeiro ensaio apresentado realizou-se entre os dias 2 e 3 de junho de 2016, que constitui o ensaio 2. Por sua vez, o segundo ensaio apresentado foi efetuado entre os dias 30 e 31 de agosto de 2016. Embora os dados apresentados façam referência a um dia completo (24 horas), os resultados que se apresentam exibem a junção dos dados obtidos entre os dias dos ensaios realizados, uma vez que os ensaios não se iniciaram às 00:00.

Relativamente aos ensaios que se apresentam é de referir ainda que ambos foram realizados com o mesmo caudal de ar, $51,3 \text{ m}^3/\text{h}$.

Da análise dos gráficos observa-se que a temperatura do ar na localização A, medida ao fim de 3,2 m do comprimento do permutador e a uma profundidade de aproximadamente 2,2 m, revela-se a que se aproxima mais da temperatura medida no exterior ao longo das 24 horas, se bem que apresenta valores mais baixos enquanto a temperatura ambiente é mais alta, e, por sua vez, valores mais elevados enquanto a temperatura ambiente revela valores mais reduzidos. Nas restantes localizações B, C, D e E, que se encontram respetivamente a 8,73 m, 14,26 m, 19,24 m e 24,77 m do comprimento do permutador de calor, o que se observa é que as oscilações da temperatura do ar são atenuadas mediante o avanço no comprimento, verificando-se valores cada vez mais baixos e mais estáveis. À vista disso, constata-se que a temperatura do ar na localização E praticamente não varia ao longo do dia, sendo que no período em que a temperatura medida no exterior é mais elevada e as necessidades de arrefecimento são requeridas, nomeadamente entre as 9:00 e as 18:00, a temperatura do ar nesta localização é significativamente mais baixa.

É este fenómeno observa-se em ambas as situações. Ainda assim, estas conclusões são extensíveis aos outros ensaios que se realizaram cujo os gráficos não se encontram apresentados

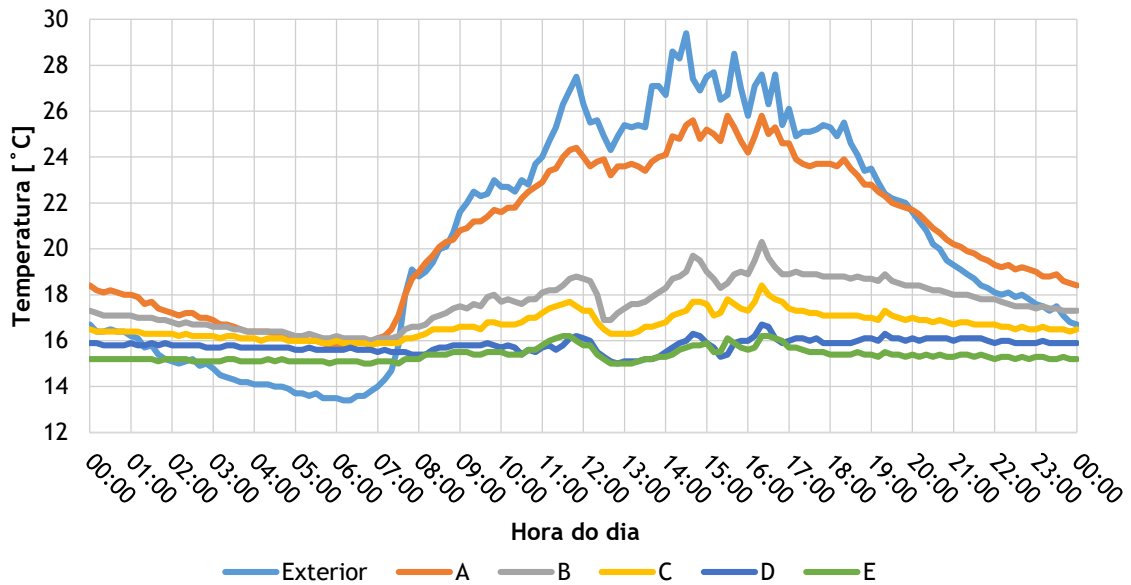


Figura 5.10 - Variação da temperatura medida no exterior e do ar ao longo do permutador entre os dias 2 e 3 de junho de 2016.

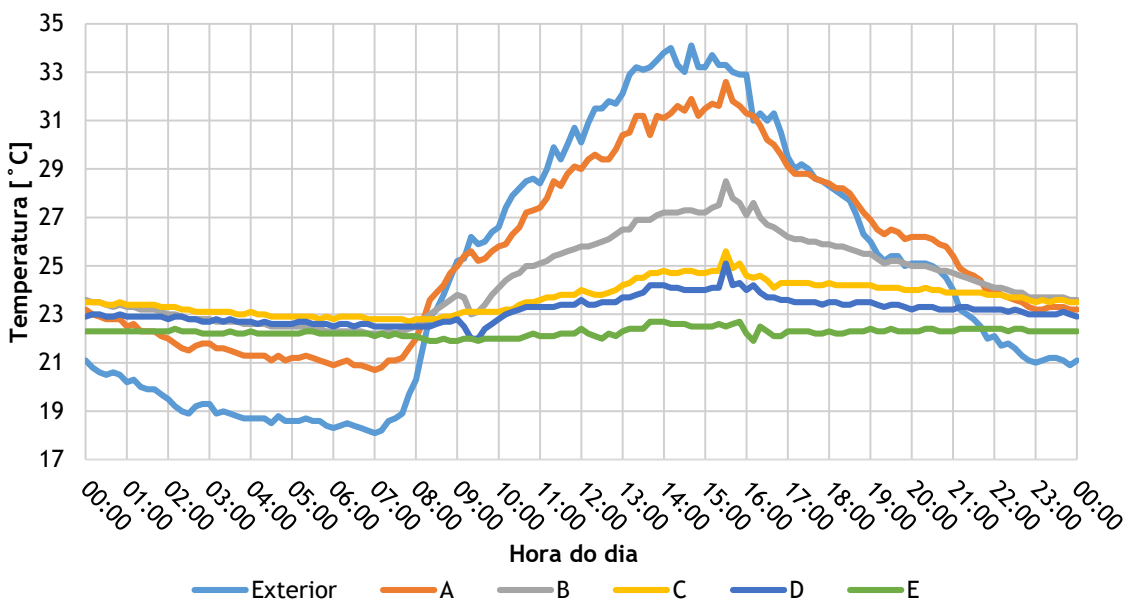


Figura 5.11 - Variação da temperatura medida no exterior e do ar ao longo do permutador entre os dias 30 e 31 de agosto de 2016.

Comparando os dois gráficos, pode-se concluir que os três meses que separam os dois ensaios realizados, refletiram-se fortemente nas temperaturas conseguidas pelo permutador de calor, em virtude do aquecimento do solo e do seu conseqüente aumento de temperatura. À vista disso, verifica-se para o ensaio realizado entre os dias 2 e 3 de junho, que durante o período das 9:00 e as 18:00 o permutador de calor conseguiu proporcionar na localização E uma temperatura média de 15,6 °C, enquanto para o ensaio realizado entre os dias 30 e 31 de agosto, esse valor apresentou-se em cerca de 22,3 °C, verificando-se um aumento de 6,7 °C. Dos dozes

ensaios realizados verificou-se, para ambos os caudais volumétrico empregues, que esta tendência deteve um aumento gradual ao longo dos 3 meses de estudo, como era de esperar.

5.2.3.2. Variação da potência (instantânea) de arrefecimento do permutador ao longo de 24 horas

Nesta secção será analisada a forma como a potência de arrefecimento e o *COP* (Coeficiente de Desempenho) do permutador variou ao longo das 24 horas de ensaio.

A potência instantânea foi calculada com base na expressão matemática (3.2), que se encontra apresentada no capítulo 3 (secção 3.2.4) do presente trabalho. Para o seu cálculo foi considerada a diferença de temperatura à entrada do permutador, que se assumiu a temperatura medida no exterior, e a temperatura do ar na posição E. Relativamente aos valores do calor específico a pressão constante (c_p) e da massa específica do ar (ρ), estes foram assumidos como constantes. Para o cálculo destas grandezas, foi estimado numa primeira fase o valor médio das temperaturas do ar apresentado em cada 10 minutos ao longo das 24 horas de ensaio para cada localização (Ambiente, A, B, C, D e E), desse resultado foi calculado a média dos valores obtidos, sendo este assumido como o valor temperatura do ar. Os valores de c_p e ρ , correspondentes a cada ensaio experimental realizado, foram obtidos recorrendo a uma interpolação linear dos valores destas grandezas apresentados por Vargaftik (1975), com base no valor da temperatura do ar obtido a cada ensaio.

Por sua vez, o *COP* instantâneo foi obtido segundo a expressão (3.5), que se encontra exposta no capítulo 3 (secção 3.2.4) da presente dissertação.

Apresentam-se na figura 5.12 e 5.13 dois gráficos, em que o primeiro faz referência a dois ensaios consecutivos, nomeadamente os ensaios 4 e 5, realizados nos dias 7 e 8 de junho, e, 8 e 9 de junho de 2016. Relativamente ao segundo gráfico, este é alusivo aos ensaios 9 e 10, efetuados nos dias 25 e 26 de julho, e, 28 e 29 de julho de 2016. À semelhança do que foi referido na secção anterior, os resultados que se apresentam exibem a junção dos dados obtidos entre de cada ensaio, respetivamente. Os valores da temperatura, do calor específico e massa específica do ar considerados para cada ensaio exibido encontram-se apresentados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Dados obtidos dos ensaios de 24 horas (temperatura do ar, c_p e ρ).

Ensaio	Temperatura [K]	ρ [kg/m ³]	c_p [kJ/kgK]
4	291,7	1,2001	1,0068
5	293,0	1,1940	1,0069
9	297,0	1,1755	1,0069
10	297,8	1,1718	1,0070

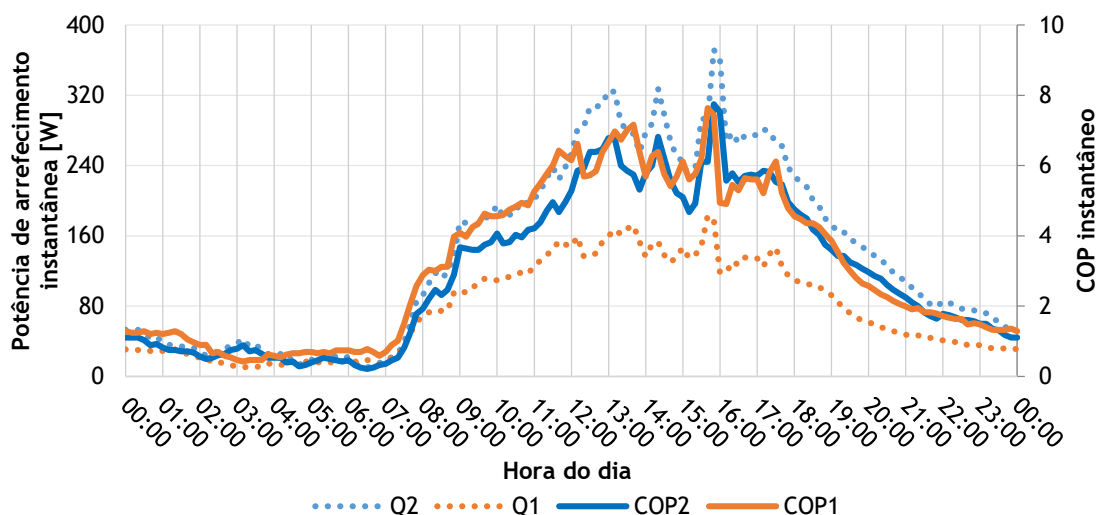


Figura 5.12 - Variação da potência de arrefecimento e COP do permutador entre os dias 7 e 8 de junho de 2016 (para Q1 e COP1 - 27,9 m³/h), e, 8 e 9 de junho de 2016 (para Q2 e COP2 - 53,1 m³/h).

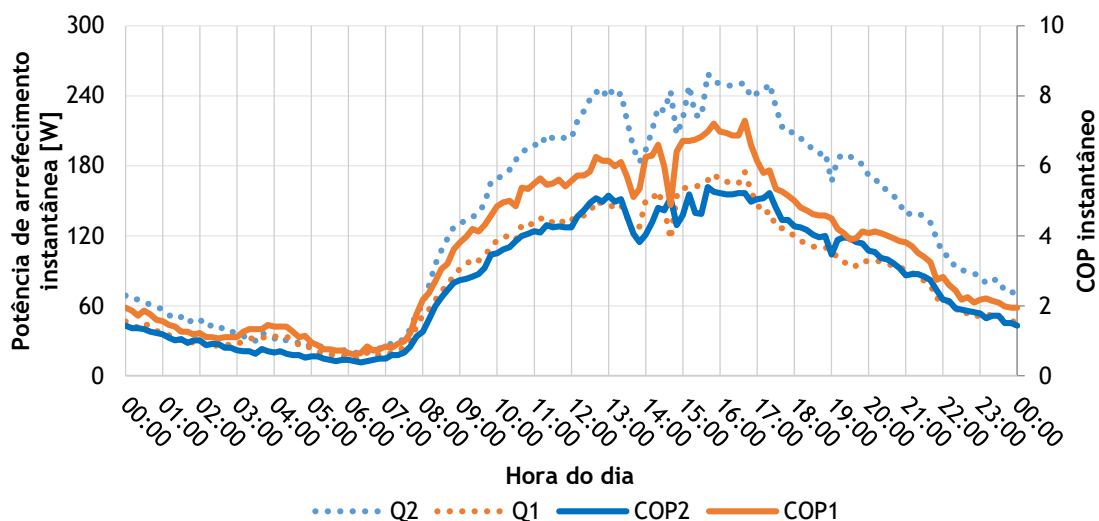


Figura 5.13 - Variação da potência de arrefecimento e COP do permutador nos dias 25 e 26 de julho de 2016 (para Q1 e COP1 - 27,9 m³/h), e, 28 e 29 de julho de 2016 (para Q2 e COP2 - 53,1 m³/h).

Da análise dos gráficos observa-se que a variação da potência de arrefecimento e do COP, em termos instantâneos, representa uma consequência direta da variação da diferença entre a temperatura medida no exterior e a temperatura do ar na localização E do permutador. À vista do que se observou nos gráficos apresentados na secção 5.2.3.1, em que a temperatura do ar medida na localização E é aproximadamente constante, pode-se, assim, concluir que a variação da potência de arrefecimento e, consequentemente, do COP, seguem a mesma tendência da variação da temperatura medida no exterior, uma vez que o valor do caudal mássico, do calor específico e da massa específica do ar se mantêm também constante.

Observar-se adicionalmente que a potência de arrefecimento instantânea se revela maior para os ensaios em que foi empregue o caudal volumétrico de 51,3 m³/h, designados nas figuras

como Q2, verificando-se uma diferença significativa face à potência instantânea alcançada nos ensaios realizados com o caudal de 27,9 m³/h, assinalado como Q1. A título de exemplo, observa-se na figura 5.12, referente aos ensaios 4 e 5, que entre as 12:00 e as 18:00 ocorreu uma diferença de cerca do dobro entre Q1 e Q2.

Por outro lado, observar-se que os *COP*'s instantâneos associados, nomeadamente *COP1* e *COP2*, apresentaram variações aproximadamente coincidentes ao longo das 24 horas. Este facto é justificado na medida que a potência eléctrica também ter duplicado, em virtude da transição da utilização de um para dois ventiladores para a obtenção do caudal volumétrico de 51,3 m³/h. Porém, este fenómeno não se verifica na figura 5.13, uma vez que nos ensaios 9 e 10 não se chegou a atingir diferenças tão significativas entre Q1 e Q2, capaz de compensar o aumento da potência eléctrica.

Também se observa, se compararmos os dois gráficos, que os pares de ensaios realizados em finais de julho proporcionaram, entre as 12:00 e as 18:00, valores de potência de arrefecimento instantânea mais reduzidos comparativamente aos pares de ensaios realizados em início de junho. Estes resultados podem ser confrontados pelo facto do solo já se encontrar a uma temperatura mais elevada, fruto do seu aquecimento gerado entre os 2 meses que separaram os pares de ensaios realizados.

É de referir ainda que estas conclusões são extensíveis aos outros ensaios que se efetuaram cujo os gráficos não se encontram apresentados.

5.2.3.3. Variação da diferença de temperatura ($T_{amb} - T$) ao longo do comprimento do permutador

Apesar dos valores da temperatura do ar ao longo das localizações A, B, C e D do permutador não participarem, de forma direta, no cálculo da sua potência de arrefecimento, revela-se de facto curioso analisar a redução da temperatura do ar mediante o avanço no comprimento do permutador de calor. Apresentam-se nesse sentido dois gráficos. No primeiro gráfico, referente à figura 5.14, expõem-se os valores obtidos da diferença entre a temperatura medida no exterior e a temperatura do ar ao longo dos cinco pontos de medição do permutador, no instante em que $T_{amb} - T_E$ foi máximo. Neste gráfico são apresentados os resultados obtidos dos ensaios 9 e 10, realizados, respetivamente, nos dias 25 e 26 de julho (para o caudal de ar de 27,9 m³/h), e, 28 e 29 de julho de 2016 (para o caudal de ar de 51,3 m³/h).

Por sua vez, no gráfico da figura 5.15 exibem-se os valores obtidos da diferença entre os valores médios da temperatura medida no exterior e da temperatura do ar ao longo dos diversos pontos do permutador, para o período entre as 9:00 às 18:00, retratando o período em que as necessidades de arrefecimento são mais solicitadas. Este gráfico faz referência aos ensaios 6 e 7 realizados, respetivamente nos dias 29 e 30 de junho (para o caudal de ar de 27,9 m³/h), e, 30 de junho e 1 de julho de 2016 (para o caudal de ar de 51,3 m³/h).

Da análise da figura 5.14, constata-se que para o instante em que $T_{amb} - T_E$ foi máxima, as reduções mais significativas foram obtidas para o caudal de ar de 27,9 m³/h, sendo que neste instante a temperatura do ar na localização E verificou-se 19,1 °C mais reduzida do que a temperatura medida no exterior. Embora ainda significativa, mas menor, para o caudal de ar de 51,3 m³/h observou-se uma redução de 15,4 °C.

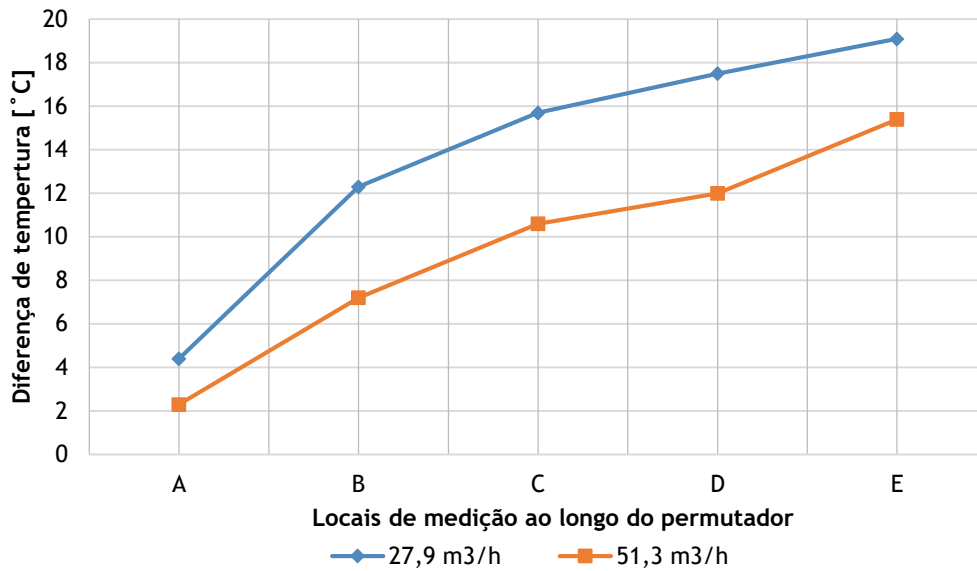


Figura 5.14 - Diferença entre a temperatura medida no exterior e a temperatura ao longo do permutador (instante em que $T_{amb} - T_E$ é máximo) referente ao ensaio 9 (para 27,9 m³/h) e ao ensaio 10 (para 51,3 m³/h).

O que se observa na figura 5.15, é que o valor médio da redução da temperatura do ar na localização E do permutador face à temperatura medida no exterior foi de aproximadamente 15,2 °C, para o ensaio em que o caudal foi menor, e de 11,8 °C para o caudal de ar de 51,3 m³/h.

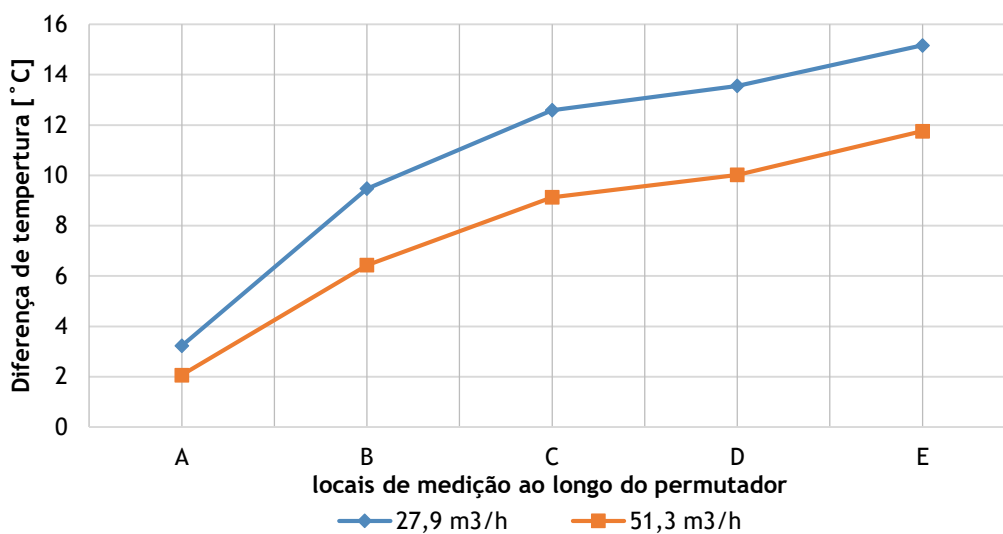


Figura 5.15 - Diferença entre a temperatura medida no exterior e a temperatura ao longo do permutador (valores médios no intervalo 9:00 - 18:00) alusivo ao ensaio 6 (para 27,9 m³/h) e ao ensaio 7 (para 51,3 m³/h).

O que se conclui da observação de ambas as figuras é que o ar ao circular no permutador de calor vê a sua temperatura reduzir-se em todos os ensaios apresentados. Quando se comparam os dois caudais volumétricos, como era de esperar, o que se verifica é que a redução da temperatura do ar é significativamente maior para os ensaios que envolvem um caudal de ar de 27,9 m³/h, que naturalmente à medida que o ar vai percorrendo o permutador vai-se reduzindo cada vez mais. É de referir que esta tendência foi observada na totalidade dos ensaios realizados cujos gráficos não se encontram exibidos.

5.2.3.4. Variação da potência de arrefecimento ao longo dos ensaios realizados

Nesta secção será analisado de que forma a potência de arrefecimento máxima (instantânea) e média variou ao longo dos 12 ensaios realizados. É de referir que os ensaios em que se variou o caudal de 27,9 para 51,3 m³/h foram realizados em dias consecutivos, de modo que as condições exteriores fossem as mais semelhantes quanto possível.

Dos resultados que se apresentam seguidamente é de realçar, novamente, que os valores do calor específico (c_p) e da massa específica do ar (ρ) foram assumidos como constantes. Estas grandezas foram calculadas com base no valor médio das temperaturas do ar apresentado em cada 10 minutos ao longo das 9 horas de ensaio (9:00 - 18:00) para cada localização (Ambiente, A, B, C, D e E) do permutador. Desse resultado foi calculado a média dos valores obtidos, sendo este assumido como o valor temperatura do ar.

Apresenta-se, assim, na figura 5.16 a variação da potência de arrefecimento instantâneo do permutador no instante em que a diferença entre a temperatura medida no exterior e a temperatura na localização E do permutador ($T_{amb} - T_E$) foi máxima, para os dozes ensaios realizados durante os 3 meses de estudo.

Pode assim observar que a potência de arrefecimento máxima do permutador relativo aos ensaios envolvendo um caudal de ar de 27,9 m³/h, rondou em cerca de 177 W. Para os ensaios realizados com um caudal volumétrico de 51,3 m³/h constata-se que a potência arrefecimento apresentou valores muito mais elevados, apresentando um valor representativo de 279 W

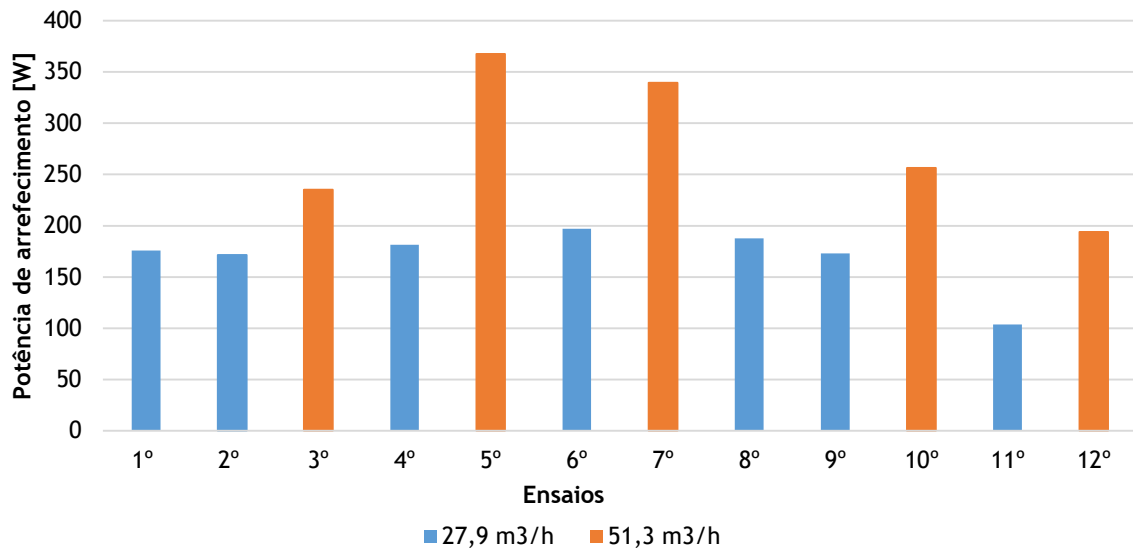


Figura 5.16 - Variação da potência de arrefecimento instantânea máxima do permutador de calor (instante em que $T_{amb} - T_E$ é máximo) ao longo dos ensaios realizados.

Apresenta-se agora na figura 5.17 a variação da potência de arrefecimento média do permutador, calculada tendo como base os valores médios da temperatura medida no exterior e da temperatura do ar na localização E do permutador entre as 9:00 e as 18:00 dos 12 ensaios experimentais realizados. Com base nos dados obtidos, verificou-se que o permutador proporcionou neste intervalo de tempo uma potência de arrefecimento média que circundou os 120 W, para os ensaios em que foi empregue o caudal de ar de 27,9 m³/h. À semelhança do que foi visualizado no gráfico anterior, contata-se que para os ensaios realizados com um caudal volumétrico de 51,3 m³/h a potência de arrefecimento média do permutador apresentou valores superiores, rondando os 192 W.

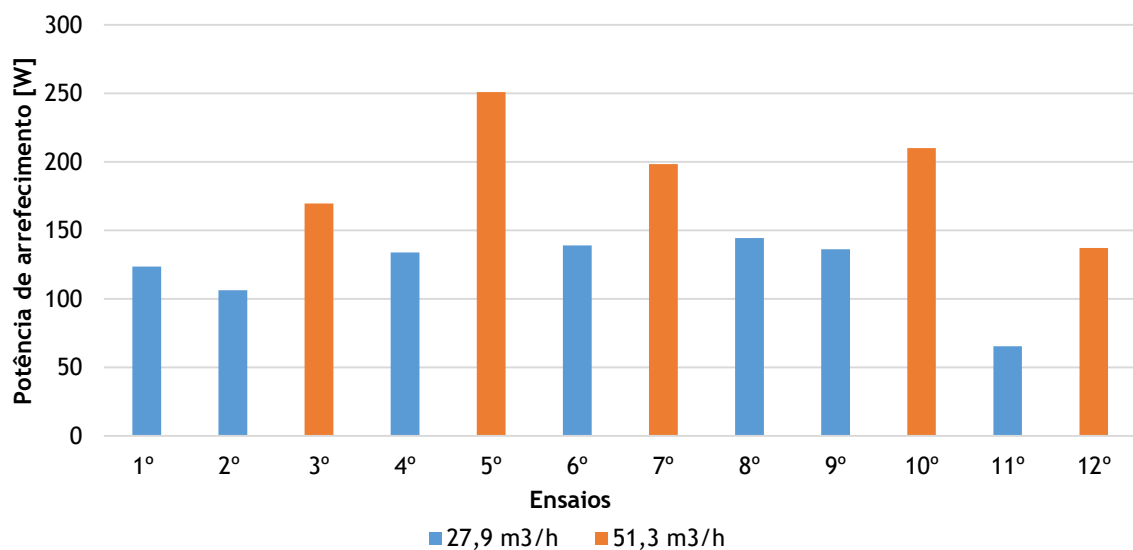


Figura 5.17 - Variação da potência de arrefecimento média do permutador de calor (valores médios no intervalo 9:00 - 18:00) ao longo dos ensaios realizados.

5.2.3.5. Variação do COP ao longo dos ensaios realizados

A partir dos dados obtidos da potência de arrefecimento máxima (instantânea) e média para os 12 ensaios realizados, tornou-se possível a determinação do COP máximo (instantâneo) e médio do permutador de calor destes mesmos ensaios.

Este índice de eficiência foi calculado a partir da expressão 3.4. Para a obtenção do COP médio do permutador de calor considerou-se a potência de arrefecimento média obtida com base nos valores médios da temperatura medida no exterior e da temperatura do ar na localização E do permutador entre as 9:00 e as 18:00 dos 12 ensaios experimentais efetuados. Por sua vez, o COP máximo (instantâneo) foi calculado com base na potência de arrefecimento máxima (instantânea) obtida no instante em que a diferença entre a temperatura medida no exterior e a temperatura do ar na localização E do permutador ($T_{amb} - T_E$) foi máxima.

É apresentada na figura 5.18 a variação do COP máximo do permutador em função dos ensaios realizados e dos respetivos caudais de ar assumidos. Observa-se no gráfico que o COP máximo do permutador, referente aos ensaios que foram utilizados um caudal volumétrico de 27,9 m³/h, consente um valor representativo de 7 unidades. No entanto, verifica-se que em virtude do aumento do consumo de energia elétrica, o COP máximo do permutador para ensaios realizados com caudal de ar de 51,3 m³/h, revela valores inferiores, rondando as 6 unidades em termos médios.

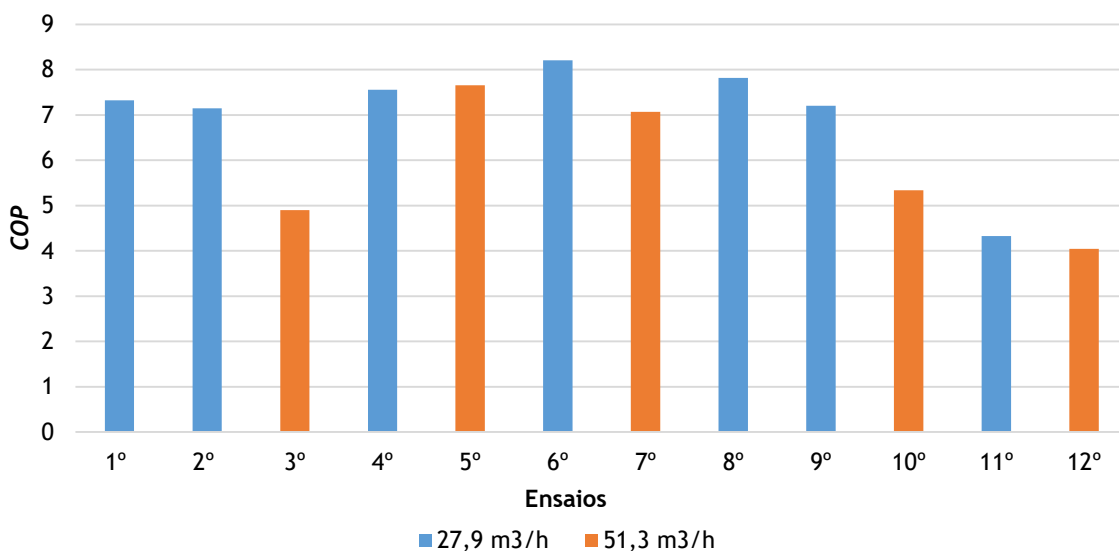


Figura 5.18 - Variação do COP instantâneo do permutador de calor (instante em que $T_{amb} - T_E$ é máximo) ao longo dos ensaios realizados

Por outro lado, visualiza-se na figura 5.19 a variação do *COP* médio do permutador de calor. Da análise do gráfico, observa-se que o permutador proporcionou durante este período um *COP* médio que rondou as 5 unidades, relativo aos ensaios que foram utilizados um caudal de ar de 27,9 m³/h. Com o aumento do caudal volumétrico e do conseqüente aumento do consumo de energia elétrica, que se indicia o dobro, observa-se que ensaios realizados com um caudal de ar de 51,3 m³/h, o *COP* médio do permutador se revelou mais reduzido, circundando as 4 unidades.

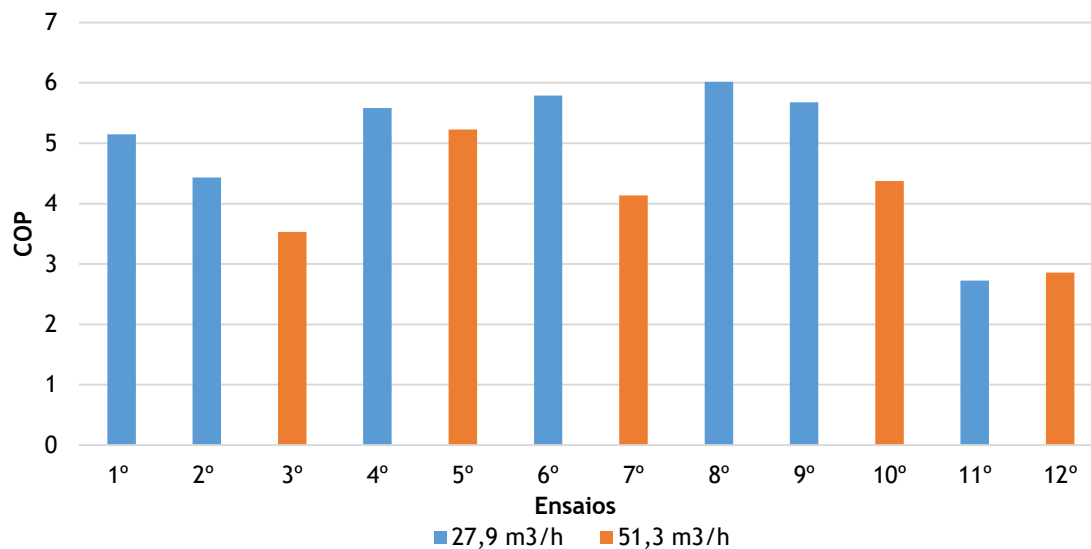


Figura 5.19 - Variação do *COP* médio do permutador de calor (valores médios no intervalo 9:00 - 18:00) ao longo dos ensaios realizados.

Com base nestes últimos dados, verifica-se que o permutador de calor é capaz proporcionar, em termos médios, uma potência de arrefecimento 121 W face a um consumo de energia elétrica de 24 W para um caudal de ar correspondente a 27,9 m³/h. Ou, ainda, uma potência de arrefecimento de 192 W para um consumo de energia elétrica de 48 W e um caudal de ar correspondente a 51,3 m³/h.

5.2.4. Nota conclusiva

Neste capítulo foram apresentados dois estudos experimentais, nomeadamente o estudo referente à monitorização da temperatura do solo em três localizações, e o estudo relativo ao permutador de calor ar-solo proposto como estratégia de arrefecimento. Para cada um destes estudos foram dadas a conhecer as condições associadas aos respetivos ensaios realizados e foram analisados os resultados obtidos para cada um dos ensaios exibidos, na medida que os restantes ensaios que não foram apresentados graficamente aduziram as mesmas tendências.

Os ensaios que fizeram referência à monitorização da temperatura do solo, tiveram como finalidade conhecer o padrão da temperatura apresentado pelo solo nas três localizações (B, C e D), em função da profundidade e do tempo, nomeadamente por períodos de 24 horas (ensaios do tipo D) e por um período de carácter sazonal (ensaios do tipo S).

Os resultados dos ensaios do tipo S revelaram que, de uma forma geral, a temperatura apresentada pelas profundidades mais superficiais do solo encontra-se fortemente influenciada pelas variações das condições exteriores exibidas ao longo dos alusivos períodos sazonais. Constatou-se que, mediante o avanço em profundidade, a temperatura do solo tende a sofrer oscilações cada vez mais reduzidas, e a apresentar um atraso no tempo mais acentuado na resposta às mudanças exibidas pelo exterior. À vista disso, observou-se que o solo, nas três localizações, apresentou temperaturas inferiores à temperatura medida no exterior em período de verão, podendo, nesse sentido, ser utilizado para o arrefecimento do ar interior de edifícios. Para o período de inverno, constatou-se para o local B e C, uma vez que o local D não contemplou a monitorização do solo neste período, que o solo proporcionou uma temperatura superior à registada no exterior. Embora superior, a temperatura do solo no local C, mesmo a 5 metros de profundidade, demonstrou apenas uma ligeira discrepância com a temperatura medida no exterior. No entanto, em termos globais, ambas as localizações permitem o uso do solo como fonte de aquecimento.

Dos resultados apresentados para as três localizações, verificou-se que subsistem algumas dissemelhanças nos valores da temperatura do solo e na amplitude térmica apresentada às profundidades analisadas. Embora todas as amostras de solo tenham sido classificadas como areias siltosas e as três localizações se enquadrem sensivelmente próximas, os solos revelaram temperaturas distintas. A diferença de altitudes, composição mineralógica, conteúdo de água do solo, exposição da superfície à radiação solar (sombreamento), entre outros fatores, poderão estar na origem das diferenças apresentadas.

Relativamente aos ensaios do tipo D, apresentaram-se dados da monitorização da temperatura do solo, metro a metro, até aos 5 metros de profundidade e da temperatura medida no exterior para três localizações (B, C e D), durante períodos de 24 horas. Foram apresentados, do conjunto dos ensaios realizados, três ensaios representativos realizados em datas diferentes. Dos resultados obtidos ficou claro que a temperatura do solo, em todas as profundidades consideradas, manteve-se praticamente constante independentemente das variações da temperatura exterior sentidas ao longo do dia.

Dos ensaios relativos ao permutador de calor ar-solo, foi possível observar o efeito da variação da temperatura do ar no permutador ao longo de 24 horas. Os resultados obtidos permitiram visualizar com clareza a redução da temperatura do ar mediante o avanço no comprimento do permutador, em que se constatou uma temperatura do ar na localização E praticamente constante em todos os ensaios realizados. Observou-se que com o decorrer do período de verão a temperatura do ar conseguida pelo permutador de calor aumentou, mantendo-se, contudo, em valores mais reduzidos que a temperatura verificada no exterior.

Foram também apresentados os valores da potência de arrefecimento e do *COP*, em termos médios e instantâneo, conseguido pelo permutador ao longo de 24 horas de ensaio. A partir dos

resultados obtidos contactou-se que a variação da potência de arrefecimento e, conseqüentemente, do *COP*, apresentaram a mesma tendência que a variação da temperatura medida no exterior.

Da análise do efeito da variação do caudal volumétrico, observou-se um aumento da potência de arrefecimento do permutador, seja em termos instantâneos seja em termos médios, com o aumento do caudal de ar. Por outro lado, constatou-se, de forma global, que com a redução do caudal de ar, apresentam-se diferenças de temperatura ($T_{amb} - T_E$) e valores de *COP*, médio e instantâneo, mais elevados.

Em suma, pode afirmar-se que os resultados experimentais obtidos mostram que o permutador de calor ar-solo proposto revela possuir potencialidades para o arrefecimento de edifícios ou outro tipo de aplicação em que essa necessidade seja também requerida.

Capítulo 6

6. Conclusão

O aproveitamento da energia geotérmica de muito baixa profundidade pode constituir uma estratégia que contribua para a mitigação do consumo de energia de edifícios. Nesse contexto, a presente dissertação teve como objetivo a monitorização do solo, em três localizações, com a finalidade de conhecer as potencialidades de arrefecimento e/ou aquecimento proporcionadas nos alusivos períodos sazonais, assim como, o desenvolvimento e estudo experimental de um permutador de calor ar-solo que pudesse ser empregue com essa finalidade.

Realiza-se neste último capítulo uma revisão do trabalho que foi desenvolvido e apresentam-se algumas sugestões para trabalho futuro.

6.1. Recapitulação

O presente trabalho apresenta duas vertentes contributivas, a primeira compreende o desenvolvimento, construção e estudo experimental de um permutador de calor ar-solo como estratégia de arrefecimento “passivo”, seja para edifícios seja para outro tipo de aplicação onde essa necessidade exista. A segunda contribuição deste trabalho comporta o desenvolvimento e construção de sondas de medição da temperatura cuja utilização experimental compreendeu a monitorização da temperatura do solo em três localizações distintas da Universidade da Beira Interior (Covilhã).

O trabalho desenvolvido foi realizado em diferentes fases, com a primeira a contemplar, precisamente, a conceção e desenvolvimento do permutador de calor e das sondas de monitorização da temperatura do solo. Relativamente ao permutador foi decidido, nesta fase, que formato lhe deveria estar associado tendo em conta dois objetivos, compacto e inovador. Foram então definidos os detalhes construtivos e os materiais a utilizar na sua construção. Quanto às sondas de medição da temperatura do solo, primeiramente foram averiguados os equipamentos disponíveis que iriam visar a realização dos furos para a implementação destas e a profundidade máxima que se poderia alcançar. À vista disso, foram então definidos os seus aspetos construtivos.

A segunda fase do trabalho compreendeu todas as etapas de construção do permutador de calor e das sondas de medição da temperatura do solo. Relativamente ao permutador, este foi contruído por tubos em PVC, envolvendo um circuito do tipo aberto e um formato helicoidal quadrangular. Esta estratégia de disposição dos tubos foi estabelecida com o intuito de proporcionar ao permutador uma elevada área de contacto com o solo circundante, e impor um

menor volume de ocupação quanto possível. O permutador possui uma entrada e uma saída de ar cuja circulação é efetuada com recurso a um ou dois ventiladores hélico-centrífugos. Quanto às sondas de monitorização da temperatura do solo, foram contruídas no total três sondas, as quais possuem cinco pontos de medição que permitem a monitorização da temperatura do solo, metro a metro, até os 5 metros de profundidade.

Após a construção do permutador e das sondas de medição da temperatura do solo, foram implementados nas instalações da Universidade da Beira Interior, nomeadamente em quatro localizações distintas. Numa fase posterior estes foram submetidos a um conjunto de ensaios experimentais que visaram conhecer, relativamente às sondas, o padrão da temperatura apresentada pelo solo em função da profundidade, através de ensaios realizados períodos de 24 horas e por um período de natureza sazonal em três localizações. Relativamente ao permutador de calor, os ensaios experimentais que lhe estiveram associados visaram avaliar o seu desempenho global (térmico e energético) ao longo da época de arrefecimento (verão), através de ensaios de 24 horas. Estes ensaios contemplaram a utilização de dois caudais volumétricos (27,9 m³/h e 51,3 m³/h) com a finalidade de analisar a resposta do permutador face o efeito da variação deste parâmetro.

A análise dos resultados obtidos referentes à monitorização da temperatura do solo, em termos sazonais, evidenciou que, efetivamente, o solo, em todas as localizações, revelou temperaturas consideravelmente inferiores às constatadas à superfície em período de verão, podendo ser exploradas para o arrefecimento do ar interior de edifícios. Para o período de inverno os resultados obtidos para o local B evidenciaram que o solo proporcionou temperaturas claramente superiores às verificadas no exterior, podendo, à vista disso, ser utilizado como fonte de aquecimento. Para o local C não se constatou com tanta evidência a diferença de temperatura medida no exterior e na temperatura do solo, embora se tenham verificado temperaturas superiores.

Com estes resultados constatou-se efetivamente que persistem dissemelhanças entre cada solo, não do ponto de vista do perfil da variação das temperaturas ao longo dos períodos sazonais analisados, mas sim nos valores apresentados nas profundidades consideradas.

Foi também monitorizado a temperatura do solo por períodos de 24 horas, nas três localizações (B, C e D), sendo que os resultados obtidos mostraram, em todas as profundidades, valores de temperatura praticamente constantes independentemente das oscilações diárias da temperatura exterior.

A análise dos resultados obtidos do permutador de calor revelou com nitidez a obtenção de temperaturas do ar consideravelmente inferiores à temperatura do ar exterior, em que verificaram-se valores da temperatura do ar praticamente constante em todos os ensaios realizados. Foram confrontados os valores de temperatura do ar obtidos pelo permutador de

calor em datas diferentes, tendo-se verificado que com o avanço da época de verão estes valores tenderam em aumentar.

Analisou-se a variação da potência de arrefecimento e do *COP* do permutador, em termos médios e instantâneo, em que se observou uma relação direta com a variação da temperatura medida no exterior.

Foi também analisado o efeito da variação do caudal volumétrico, em que se conclui que, em virtude do seu aumento, a potência de arrefecimento do permutador aumentou. Porém, verificaram-se diferenças de temperatura ($T_{amb} - T_E$) e valores de *COP*, em termos globais dos ensaios realizados, mais reduzidos.

Os resultados obtidos de ambos os estudos realizados revelaram, efetivamente, que o solo pode ser utilizado como fonte de aquecimento e arrefecimento, sendo que a utilização de permutadores pode representar uma estratégia viável para contribuir na redução da procura de energia elétrica direcionada para o aquecimento e arrefecimento de edifícios ou outro tipo de infraestrutura.

6.2. Trabalho Futuro

Na secção precedente foram apresentadas as diferentes fases do trabalho desenvolvido. Do conhecimento adquirido da sua realização apontam-se novos trabalhos a desenvolver futuramente, os quais se relacionam com o contexto do presente trabalho. Descrevem-se de seguida alguns dos aspetos sugeridos a realizar.

Numa primeira fase sugere-se a realização de ensaios experimentais do permutador de calor ar-solo em período de inverno, com o objetivo de analisar o seu desempenho numa estratégia de aquecimento.

Sugere-se a implementação de uma sonda de monitorização da temperatura do solo no local onde se encontra instalado o permutador de calor, tendo em vista comparar os valores registados da temperatura do solo com a temperatura do ar registado, à mesma cota, pelos termopares instalados ao longo do permutador.

Com o propósito de promover uma maior sustentabilidade energética do permutador de calor propõem-se o acoplamento de um painel fotovoltaico (PV). O objetivo desta coligação será de beneficiar da energia elétrica produzida pelo PV, através da conversão da energia solar, para mitigar, ou mesmo eliminar, o consumo energético oriundo da rede para alimentar as unidades de ventilação.

Podem ainda introduzir-se outros tipos de estratégias que promovam o incremento o potencial de arrefecimento e aquecimento do permutador de calor. Da revisão bibliográfica evidenciam-se alguns sistemas passivos suscetíveis a associar ao permutador desenvolvido, referenciam,

assim, a integração de um sistema de aquecimento de ar solar e de um sistema de arrefecimento evaporativo. Evidencia-se que na empregabilidade da estratégia de arrefecimento evaporativo, este não deverá encontrar-se associado na conduta responsável pela admissão de ar, com o intuito de diminuir a possibilidade da acumulação de condensados no interior da tubagem.

Propõem-se a modificação do tipo de cobertura da superfície do solo onde se encontra implementado o permutador de calor. Dos ensaios realizados ao longo do período de verão, constatou-se um aumento substancial das temperaturas alcançadas pelo permutador, fruto do aquecimento do solo. Sugerem assim algumas estratégias, como a utilização de uma camada de seixos, vegetação, ou ainda a irrigação do solo, que promovam a minimização dos efeitos gerados pelas condições exteriores, nomeadamente radiação solar, na temperatura da superfície do solo e subsequentes camadas mais profundas. Espera-se que a utilização de algumas destas estratégias proporcione uma melhoria do desempenho do permutador.

Outra proposta seria a realização de uma análise económica do permutador, nomeadamente calcular o período de retorno sobre o investimento efetuado em virtude dos ganhos conseguidos na poupança de energia na sua utilização como estratégia de climatização.

Referências bibliográficas

Abu-Hamdeh, N. H., *Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content*, Biosystems Engineering, Vol. 86, pp. 97-102, 2003.

Ahmed, S. F., Khan, M. M. K., Amanullah, M. T. O., Rasul, M. G., e Hassan, N. M. S., *Parametric study on thermal performance of horizontal earth pipe cooling system in summer*, Energy Conversion and Management, Vol. 114, pp. 324-337, 2016.

Ahmed, S. F., Khan, M. M. K., Amanullah, M. T. O., Rasul, M. G., e Hassan, N. M. S., *Performance assessment of earth pipe cooling system for low energy buildings in a subtropical climate*, Energy Conversion and Management, Vol. 106, pp. 815-825, 2015.

Albuquerque, F. J. R. A., *Energia Geotérmica em Edifícios - O caso do Hotel do Parque no Campo Geotérmico e Hidromineral de São Pedro do Sul*, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Geotecnia Aplicada, Faculdade de Engenharia, UBI, Portugal, 2011.

Alkaff, S. A., Sim, S. C., e Efsan, M. N. E., *A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 60, pp. 692-713, 2016.

Alnefaie, K. A, e Abu-Hamdeh, N. H., *Specific Heat and Volumetric Heat Capacity of Some Saudian Soils as affected by Moisture and Density*, Proceedings of the 2013 International Conference on Mechanics, Fluids, Heat, Elasticity and Electromagnetic Fields, 2013.

Al-Temeemi, A. A., e Harris, D. J., *A guideline for assessing the suitability of earth-sheltered mass-housing in hot-arid climates*, Energy and Buildings, Vol. 36, pp. 251-260, 2004.

Alrtimi, A., Rouainia, M., e Haigh, S., *Thermal conductivity of a sandy soil*, Applied Thermal Engineering, Vol. 106, pp. 551-560, 2016.

Banks, D., *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*, Blackwell Publishing, Oxford, pp.348, 2008.

Bansal, V., Misra, R., Das Agarwal, G., e Mathur, J., *Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger*, Applied Energy, Vol. 103, pp. 1-11, 2013.

Bansal, V., e Mathur, J., *Performance enhancement of earth air tunnel heat exchanger using evaporative cooling*, International Journal of Low-Carbon Technologies, Vol. 4, pp. 150-158, 2009.

Barnard, N., e Jaunzens, D., *Technology selection and early design guidance*, IEA Annex 28 Subtask 2: Design tools for low energy cooling, Building Research Establishment, 2001. ISBN: 1-86081-4581.

Barakat, S., Ramzy, A., Hamed, A. M., e El Emam, S. H., *Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system*, Energy Conversion and Management, Vol. 111, pp. 137-146, 2016.

Barry-Macaulay, D., Bouazza, A., Singh, R. M., Wang, B., e Ranjith, P. G., *Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region*, Engineering Geology, Vol. 164, pp. 131-138, 2013.

Batjes, N. H., e Batjes, E. M., *A review of soil factors and processes that control fluxes of heat, moisture and greenhouse gases*, Technical Paper 23, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, 1992.

Bezyan, B., Porkhial, S., e Mehrizi, A. A., *3-D simulation of heat transfer rate in geothermal pile-foundation heat exchangers with spiral pipe configuration*, Applied Thermal Engineering, Vol. 87, pp. 655-668, 2015.

Benhammou, M., Draoui, B., Zerrouki, M., e Marif, Y., *Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate*, Energy Conversion and Management, Vol. 91, pp. 1-11, 2015.

Benhammou, M., e Draoui, B., *Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 44, pp. 348-355, 2015.

Bojic, M., Trifunovic, N., Papadakis, G., e Kyritsis, S., *Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building*, Energy, Vol. 22, pp. 1151-1158, 1997.

Brandl, H., *Energy foundations and other thermo-active ground structures*, Géotechnique, Vol. 56, pp. 81-122, 2006.

British Petroleum (BP), *BP Statistical Review of World Energy June 2016*, BP Annual Report, 2016.

Burton, S., *COOLHOUSE Final Technical Report May 2004*, Energie Demonstration Project NNE5, 2004.

Cai, G., Zhang, T., Pippala, A., J., e Liu, S., *Thermal characterization and prediction model of typical soils in Nanjing area of China*, Engineering Geology, Vol. 191, pp. 23-30, 2015.

Caputo, H. P., *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*, Sexta Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora, pp. 234, 1988.

Chel, A., e Tiwari, G. N., *Performance evaluation and life cycle cost analysis of earth to air heat exchanger integrated with adobe building for New Delhi composite climate*, Energy and Buildings, Vol. 41, pp. 56-66, 2009.

Chel, A., e Tiwari, G. N., *Stand-alone photovoltaic (PV) integrated with earth to air heat exchanger (EAHE) for space heating/cooling of adobe house in New Delhi (India)*, Energy Conversion and Management, Vol. 51, pp. 393-409, 2010.

Chesworth, W., Spaargaren, O., e Hadas, A., *Thermal Regime*, Encyclopedia of Soil Science, Springer, pp. 767-772, 2016.

Cook, J., *Passive cooling*, Solar Heat Technologies: Fundamentals and Applications, Cambridge, Vol. 8, pp. 197-346, 1989.

Costa, R. P. F. G. R., *Modelação térmica da Central Geotérmica do Pico Vermelho*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, UA, Portugal, 2012.

Dasare, R. R., e Saha, S. K., Numerical study of horizontal ground heat exchanger for high energy demand applications, Applied Thermal Engineering, Vol. 85, pp. 252-263, 2015.

Diaz, S. E., Patiño-Carachure, C., e Herrera-Castillo, J. A., *Reducing the energy consumption of an earth-air heat exchanger with a PID control system*, Energy Conversion and Management, Vol. 77, pp. 1-6, 2014.

Diaz, S. E., Sierra, J. M. T., e Herrera, J. A., *The use of earth-air heat exchanger and fuzzy logic control can reduce energy consumption and environmental concerns even more*, Energy and Buildings, Vol. 63, pp. 458-463, 2013.

Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), *Aproveitamento dos Recursos Geotérmicos em 2015*, 2016.

Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), *Balanço Energético 2014*, 2015.

Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), *Balanço Energético Sintético 2015*, 2016.

Do, S. L., Baltazar, J. C., e Haberl, J., *Potential cooling savings from a ground-coupled return-air duct system for residential buildings in hot and humid climates*, Energy and Buildings, Vol. 103, pp. 206-215, 2015.

Dokkar, H., Negrou, B., Chenouff, N., Settou, N., e Benmhidi A., *Passive cooling of telecom shelter using solar chimney with earth-air heat exchanger*, Recent Advances in Energy, Environment, Biology and Ecology, pp. 134-138, 2010.

Electricidade dos Açores (EDA), *Relatório e contas*, 2015.

European Commission, Communication from the Commission to the European Parliament and the Council, *Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy*, 2014.

European Commission, *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the EU Strategy for Heating and Cooling part 1/2*, 2016c.

European Commission, *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the EU Strategy for Heating and Cooling part 2/2*, 2016d.

European Commission, Directorate General for Energy and Transport, *Europe's Energy Position - Present & Future, Market Observatory for Energy - Report 2008*, 2008.

European Commission, *Energy Consumption and Energy Efficiency Trends in the EU-28 2000-2014*, 2016.

European Commission, *EU Energy, Transport And GHG Emissions Trends to 2050 Reference Scenario 2013*, 2013.

European Commission, *EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050*, 2016b.

European Geothermal Energy Council (EGEC), *EGEC's response to the EC Public consultation exercise on the Promotion of Heating and Cooling from Renewable Energies*, Brussels, 2006.

Eurostat, *Energy dependency in the EU - The EU was dependent on energy imports for slightly over half of its consumption in 2014*, 2016.

Farouki, O. T., *Thermal properties of soils*, Highway Research Board Special Report, New Hampshire: United States Army Corps of Engineers - Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Monograph 81-1, pp. 151, 1981.

Figueira, L. I. N., *Caracterização Físico-Mecânica dos Solos da Bacia Hidrográfica de Santa Luzia no Âmbito do Projeto “MonitorizaRibeiras” do LREC*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, UMA, Portugal, 2015.

Florides, G., e Kalogirou, S., *Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications*, Renewable Energy, Vol. 32, pp. 2461-2478, 2007.

Gao, Y., Fan, R., Li, H., Liu, R., Lin, X., Guo, H., e Gao, Y., *Thermal performance improvement of a horizontal ground-coupled heat exchanger by rainwater harvest*, Energy and Buildings, Vol. 110, pp. 302-313, 2016.

Ghosal, M. K., e Tiwari, G. N., *Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse*, Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 1779-1798, 2006.

Givoni, B., *Cooled soil as a cooling source for buildings*, Solar Energy, Vol. 81, pp. 316-328, 2007.

Gomes, R. D. F., *Estudo e Concepção de Sistemas de Ventilação Natural em Edifícios de Habitação*, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, UMA, Portugal, 2010.

Gonçalves, H. e Nascimento, H., *Prémio DGE 2003 - Eficiência energética em Edifícios*, DGGE, 2005.

Hillel, D., *Introduction to Soil Physics*, first edição, Academic Press, New York, pp. 155-175, 1982.

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

Hollmuller, P., Lamberts, R., Westphal, F. S. Ordenes, M. M. e Carlo, J. C., *Potencial da ventilação inercial para resfriamento passivo em climas brasileiros*, ENCAC 2005 VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e IV Conferência Latino-americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações, Maceió, Alagoas, Brasil, 2005.

INETI, *Edifício Solar XXI - Um Edifício energeticamente eficiente em Portugal*, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P, Departamento de Energias Renováveis, (2005).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change - Working Group III Contribution to the Fifth Assessment*, 2014.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2014 Synthesis Report*, 2015.

International Energy Agency (IEA), *Transition to Sustainable Buildings - Strategies and Opportunities to 2050*, 2013.

Jakhar, S., Misra, R., Bansal, V., Soni, M.S., *Thermal performance investigation of earth air tunnel heat exchanger coupled with a solar air heating duct for north western India*, Energy and Buildings, Vol. 87, 360-369, 2015.

Khabbaz, M., Benhamou, B., Limam, K., Hollmuller, P., Hamdi, H., e Bennouna, A., *Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate*, Energy and Buildings, Vol. 125, pp. 109-121, 2016.

Lawrence, D., e Slater, A., *Incorporating organic soil into a global climate model*, Climate Dynamics, Vol. 30, pp. 145-160, 2008.

Lee, J., Kim, T., e Leigh, S., *Applications of building-integrated coil-type ground-coupled heat exchangers—Comparison of performances of vertical and horizontal installations*, Energy and Buildings, Vol. 93, pp. 99-109, 2015.

Lee, K. H., e Strand, R. K., *The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings*, Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 486-494, 2008.

Lehnert, M., *Factors affecting soil temperature as limits of spatial interpretation and simulation of soil temperature*, Acta Universitatis Palackianae Olomucensis - Geographica, Vol. 45, pp. 5-21, 2014.

LNEC, *Especificação E 195: Solos - Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1966.

LNEC, *Norma Portuguesa Definitiva NP-143: Determinação dos Limites de Consistência*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1969.

LNEC, *Especificação E 239: Solos - Análise Granulométrica por Peneiração Húmida*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1970.

Lopes, F. S. M. E., *Dimensionamento de um Permutador de Calor Terra-Ar e Avaliação de Impacte na Climatização de um Edifício*, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica, IST, Portugal, 2012.

Lopes, H. L. S., *Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia Estudos de Caracterização Térmica*, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia), UNL, Portugal, 2014.

Lourenço, C., e Cruz, J., *Os Recursos Geotérmicos de Baixa Entalpia em Portugal Continental e seu Tipo de Aproveitamento*, Boletim de Minas, Vol. 41, pp. 175-186, 2006.

Manjul, R. R., e Bartaria, V. N., *Earth air heat exchanger performance in summer cooling for various supply air conditions – A Review*, International Journal of Engineering Trends and Technology, Vol. 35, pp. 387-390, 2016.

Mathur, A., Surana, A. K., Verma, P., Mathur, S., Agrawal, G. D., e Mathur, J., *Investigation of soil thermal saturation and recovery under intermittent and continuous operation of EATHE*, Energy and Buildings, Vol. 109, pp. 291-303, 2015.

McCorry, M., e Jones, G., *Geotrainet Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems*, GEOTRAINET, EFG, Brussels, pp. 192, 2011.

Ministério da Economia da Inovação e do Desenvolvimento, *Estratégia Nacional de Energia - ENE 2020*, 2010.

Misra, A. K., Gupta, M., Lather, M., e Garg, H., *Design and Performance Evaluation of Low Cost Earth to Air Heat Exchanger Model Suitable for Small Buildings in Arid and Semi Arid Regions*, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 19, pp. 853-856, 2014.

Misra, R., Bansal, V., Das Agarwal, G., Mathur, J., e Aseri, T., *Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger*, Energy and Buildings, Vol. 49, pp. 531-535, 2012.

Mogharreb, M. M., Abbaspour-Fard, M. H., Goldani, M., e Emadi, B., *The effect of greenhouse vegetation coverage and area on the performance of an earth-to-air heat exchanger for heating and cooling modes*, International Journal of Sustainable Engineering, Vol. 7, pp. 245-252, 2014.

Monteiro, M. O. S., *Permutadores de calor ar-solo. Análise da pré-viabilidade.*, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos, UA, Portugal, 2008

Neves, L., Pereira, A., e Dias, J. M., *Os Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS/HDR): um desafio para o século XXI*, Imprensa da Universidade de Coimbra, Laboratório de Radioactividade Natural da Universidade de Coimbra, 2011.

ODYSSEE, *Energy Efficiency Trends and Policies in the Household and Tertiary Sectors, An Analysis Based on the ODYSSEE and MURE Databases*, 2015.

Ozgener, L., *A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 4483-4490, 2011.

Ozgener, O., e Ozgener, L., *Exergoeconomic analysis of an underground air tunnel system for greenhouse cooling system*, International Journal of Refrigeration XXX, Vol. 48, pp. 1-11, 2010.

De Paepe, M., e Janssens, A., *Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchanger*, Energy and Buildings, Vol. 35, pp. 389-397, 2003.

Pfafferott, J., *Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency*, Energy and Buildings, Vol. 35, pp. 971-983, 2003.

Pregitzer, K. S., e King, J. S., *Effects of Soil Temperature on Nutrient Uptake, An Ecological Perspective*, Springer, pp. 277-310, 2005.

Ramalho, E. C., Madureira, P., Lourenço, C., Francés, A., Joyce, A., Silva, L. D., e Silva, L., *A Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial e o seu papel na dinamização do mercado da geotermia em Portugal*, Comunicações Geológicas, Vol. 101, pp. 837-840, 2014.

Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., Davies, M., e Thomas, H. R., *Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 4, pp. 213-265, 2000.

REHAU, *The lakes by yoo*, 2009.

REHAU, *Energy piles with RAUGEO HELIX XXL*, 2013.

Rocha, S. S. P. G., *Caracterização de Sistemas Hidrotermais de Baixa Entalpia na Ribeira Grande, Ilha de S. Miguel, Açores*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica - Georrecursos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL, Portugal, pp. 113, 2011.

Rodrigues, L. T., e Gillott, M., *A novel low-carbon space conditioning system incorporating phase-change materials and earth-air heat exchangers*, International Journal of Low-Carbon Technologies, pp. 1-12, 2013.

Roth, K., *Soil Physics*, Institute of Environmental Physics, Heidelberg University, pp. 391, 2012.

Santamouris, M., e Kolokotsa, D., *Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art*, Energy and Buildings, Vol. 57, pp. 74-94, 2013.

Sharan, G., Prakash, H., e Jadhav, R., *Air-cooling and Heating System for Tiger in Zoo using Earth Tube Heat Exchanger*, 2002.

Sharan, G., Prakash, H., e Jadhav, R., *Performance of Greenhouse Coupled to Earth-Tube-Heat-Exchanger in Closed-Loop Mode*, 2004.

Silva, A. T. A. F., *Controlo da compactação com recurso a gamadensímetro - Caso de estudo: ETAR de Castelo Branco*, Relatório de estágio apresentado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Departamento de Engenharia Geotécnica, ISEP, Portugal, 2013.

Singh, D. N., e Devid, K., *Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity*, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 22, pp. 133-143, 2000.

Society, N. Z., *Field Description of Soil and Rock - Guideline for the Field Classification and Description of Soil and Rock for Engineering Purposes*, NZGS, Nova Zelândia, 2005.

Soni, S. K., Pandey, M., e Bartaria, V. N., *Hybrid ground coupled heat exchanger systems for space heating cooling applications: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 60, pp. 724-738, 2016.

Sousa, E. C., *Aplicabilidade de sistemas de ventilação com permutador de calor ar-solo no clima português*, Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, UM, Portugal, 2014.

Spiga, A., Forget, F., Madeleine J. P., Montabone, L., Lewis, S. R., e Millour, E., *The impact of martian mesoscale winds on surface temperature and on the determination of thermal inertia*, Icarus, Vol. 212, pp. 504-519, 2011.

Staniec, M., e Nowak, H., *Analysis of the earth-sheltered buildings' heating and cooling energy demand depending on type of soil*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 11, pp. 221-235, 2011.

Shukla, M. K., e Lal, R., *Principles of soil physics*, The Ohio State University Columbus, Ohio, U.S.A., Marcel Dekker, New York - Basel, pp. 699, 2004.

Tarara, M. J, e Hoheisel, G. A., *Low-cost Shielding to Minimize Radiation Errors of Temperature Sensors in the Field*, HortScience, Vol. 42, pp. 1372-1379, 2007.

Tidall, J. A., Kunkel, J. R., e Anderson, D. E., *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*, New Jersey: Prentice Hall, 1999.

U.S. Department of Energy, *The Future of Air Conditioning for Buildings*, 2016.

U.S. Energy Information Administration (EIA), *International Energy Outlook 2016*, 2016.

Van Dronkelaar, C., Cóstola, D., Mangkuto, R. A., e Hensen, J. L. M., *Heating and cooling energy demand in underground buildings: Potential for saving in various climates and function*, Energy and Buildings, Vol. 71, pp. 129-136, 2014.

Van Dronkelaar, C., *Underground buildings*, Dissertação de Mestrado, Eindhoven University of Technology, Holanda, 2013.

Vargaftik, N. B., *Tables of Thermophysical Properties of Liquids and Gases*, Second edition, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1975.

Woodson, T., Coulibaly, Y., e Traoré, E. S., *Earth-Air Heat Exchangers for Passive Air Conditioning: Case Study Burkina Faso*, Journal of Construction in Developing Countries, Vol. 17, pp. 21-32, 2012.

Vlad, G. E., Ionescu, C., Necula, H., e Badeia, A., *Thermoeconomic design of an earth to air heat exchanger used to preheat ventilation air in low energy buildings*, Recent Researches in Energy, Environment, Entrepreneurship, Innovation, pp. 11-16, 2011.

Wu, H., Wang, S., e Zhu, D., *Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air-pipe systems*, Energy Conversion and Management, Vol. 48, pp. 1462-1471, 2007.

Yuping, H., Shengqin, J., liqian, Z., Qiao, C. e Bianco, C., *Cooling System of Outdoor Cabinet using Underground Heat Pipe*, IEEE - 30th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), pp. 1-5, 2008.