



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

Utilização de permutadores de calor ar-solo na climatização de estufas agrícolas

Nuno Carvalho Godinho

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletromecânica

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires

Co-orientador: Professor Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva

Covilhã, junho de 2019

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero expressar o meu maior agradecimento aos meus orientadores, Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires e Professor Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva, pela sua dedicação, empenho, disponibilidade e apoio na concretização deste trabalho. Grato também pelas recomendações dadas e conhecimento transmitido.

Quero agradecer também ao Sr. João Correia, técnico do Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor da Universidade da Beira Interior, por toda a disponibilidade e contribuição durante a construção e instalação experimental.

A todos os meus amigos e colegas de curso que contribuíram para a concretização deste projeto e para o meu sucesso académico.

Aos meus pais, irmão e namorada que sempre me apoiaram no meu percurso académico. Obrigado por nunca desistirem de mim e pelo incentivo dado para que pudesse concluir esta fase importante da minha vida.

Resumo

As estufas têm o objetivo de promover as condições ideais para o crescimento das plantas e culturas, é assim importante a climatização do ambiente interior da estufa. Existem diversos tipos de sistemas de climatização, no entanto, eles consomem energia excessivamente e a consequente libertação de gases poluentes para a atmosfera. Um permutador de calor enterrado no solo pode ser utilizado para aquecimento/arrefecimento de estufas agrícolas, aproveitando deste modo a camada superficial terrestre, capaz de manter uma temperatura aproximadamente constante ao longo do ano. O trabalho apresentado procura estudar a possibilidade da utilização de um permutador ar-solo na climatização de uma estufa agrícola. Com esse objetivo, foram realizados dois testes experimentais, um correspondente à monitorização da temperatura do solo em três locais distintos e o outro foi o estudo da climatização da estufa por meio de um permutador de calor ar-solo. Relativamente ao estudo da monitorização do solo nos três locais, pretende-se avaliar as temperaturas da superfície terrestre até 5 m de profundidade. Os resultados obtidos mostram a diminuição da amplitude térmica com o aumento da profundidade. Já o estudo da climatização da estufa por meio de um permutador de calor ar-solo tinha a finalidade de se perceber a capacidade que o permutador de calor ar-solo tem para climatizar uma estufa agrícola. Dos ensaios realizados realça-se que o permutador de calor permitiu sempre o aumento ou a diminuição da temperatura da estufa de teste, caso fosse em regime de aquecimento ou arrefecimento. No melhor resultado de ensaio o permutador de calor garantiu, em relação à estufa de controlo, uma temperatura média de +1,5 °C em regime de aquecimento e de -3,2 °C em regime de arrefecimento. Alcançaram-se em determinados instantes valores de potência e COP na ordem dos 500 W e 4,2, respetivamente. Com os resultados obtidos conclui-se que o permutador de calor ar-solo pode ser visto como uma alternativa válida para a climatização de uma estufa agrícola.

Palavras-chave

Aquecimento, Arrefecimento, Solo, Fonte térmica, Amplitude térmica, Permutador calor ar-solo, Temperatura, Monitorização, Estufa, Agrícola, Climatização

Abstract

The greenhouses aim to promote the ideal conditions for the growth of plants and crops, so it is important to air-conditioning the indoor environment of the greenhouse. There are several types of climatization systems, however, they consume energy excessively and they consequently release of polluting gases into the atmosphere. A heat exchanger buried in the ground can be used to heat/cool agricultural greenhouses, thus taking advantage of the superficial surface layer of ground, capable of maintaining an approximately constant temperature throughout the year. The work presented seeks to study the possibility of using an earth to air heat exchanger in the climatization of an agricultural greenhouse. With this objective, two experimental tests were performed, one corresponding to the soil temperature monitoring in three different locations and the other was the study of the greenhouse climatization from an earth to air heat exchanger. About the study the soil monitoring in the three sites, it is intended to evaluate the earth surface temperatures up to 5 m depth. The obtained results show the decrease of the thermal range with the increase of depth. The study of air conditioning of the greenhouse by means of an earth to air heat exchanger had the purpose of perceiving the capacity that the air-to-ground heat exchanger has to climatize an agricultural greenhouse. From the tests carried out it is noted that the heat exchanger always allowed the increase or decrease the temperature of the test, in the case of heating or cooling. In the best test result the heat exchanger ensured an average temperature of +1.5 °C under heating and -3.2 °C under cooling. Power and COP values in the order of 500 W and 4.2, respectively, were reached. With the results obtained it is concluded that the earth to air heat exchanger can be seen as a valid alternative for the air-conditioning of an agricultural greenhouse.

Keywords

Heating, Cooling, Soil, Thermal source, Thermal range, earth to air heat exchanger, Temperature, Monitoring, Greenhouse, Agricultural, Air conditioning

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de símbolos.....	xix
Símbolos Gregos.....	xix
Lista de Acrónimos.....	xx
1. Introdução	1
1.1. Relevância e enquadramento no tema	1
1.2. Objetivos e contribuição da dissertação.....	4
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. Fundamentos teóricos e revisão bibliográfica	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Estufas agrícolas	7
2.2.1. Tipos de estufas	9
2.2.2. Aspetos construtivos	10
2.2.2.1. Estruturas	11
2.2.2.2. Altura da estrutura	11
2.2.2.3. Fundação e ancoragem	11
2.2.2.4. Material de revestimento.....	12
2.2.2.5. Localização, orientação e radiação.....	12
2.2.2.6. Ventilação	13
2.2.3. Exigências, métodos e sistemas na climatização de estufas.....	13

2.2.3.1. Sistemas de aquecimento	18
2.2.3.2. Sistemas de arrefecimento.....	23
2.2.3.3. Sistemas combinados.....	26
2.3. Potencial do solo como fonte térmica	27
2.3.1. Regime térmico do solo	27
2.3.2. Propriedades térmicas do solo	28
2.4. Permutadores de calor ar-solo	30
2.4.1. Princípio de funcionamento	31
2.4.2. Tipos de permutadores ar-solo.....	32
2.4.3. Parâmetros e fatores influentes	36
2.4.4. Análise energética	38
2.4.5. Aplicações	39
2.4.5.1. Estufas agrícolas	39
2.4.5.2. Edifícios residenciais e de serviços	41
2.4.5.3. Outros.....	44
2.5. Nota conclusiva	44
3. Instalação experimental e metodologia	45
3.1. Introdução.....	45
3.2. Permutador de calor ar-solo	45
3.2.1. Localização geográfica	45
3.2.2. Descrição e especificações	46
3.3. Estufas	47
3.3.1. Descrição e especificações	47
3.3.2. Construção.....	48
3.3. Equipamentos auxiliares	53

3.3.1. Medição de temperatura	53
3.3.2. Medição da potência	54
3.3.3. Medição da velocidade	55
3.3.4. Ventilação	55
3.3.5. Aquecimento	56
3.4. Instalação experimental integral.....	57
3.5. Metodologia de ensaio	60
3.5.1. Monitorização da temperatura do solo	60
3.5.2. Ensaio com a estufa e o permutador de calor ar-solo	62
3.5.2.1. Ensaio em vazio	67
3.5.2.2. Ensaio em aquecimento.....	70
3.6. Nota conclusiva.....	71
4. Análise e discussão de resultados.....	73
4.1. Introdução.....	73
4.2. Monitorização da temperatura do solo	73
4.3. Climatização de uma estufa por meio de um permutador de calor ar-solo	77
4.3.1. Comparação de temperaturas entre as duas estufas.....	77
4.3.2. Potência de aquecimento/arrefecimento do permutador de calor	80
4.3.3. Diferença de potências consumidas pelos termoventiladores	83
4.4. Nota conclusiva.....	85
5. Conclusão	87
5.1. Recapitulação.....	87
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	89
Referências bibliográficas	91

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Instalação mundial de energia geotérmica e utilização anual de 1995 a 2015 [8].	3
Figura 2.1 - Estufas agrícolas de Almeria, Espanha [9].	8
Figura 2.2 - Maiores áreas de produção de hortícolas em estufas em todo o mundo [12].	9
Figura 2.3 - Trocas de calor entre os vários componentes presentes numa estufa. Adaptado de [22].	15
Figura 2.4 - Classificação de vários sistemas de climatização em estufas agrícolas [18].	18
Figura 2.5 - Unidade de aquecimento de ar [11].	19
Figura 2.6 - Caldeira [11].	19
Figura 2.7 - Estufa com sistema de retenção de calor parede norte [31].	22
Figura 2.8 - Estufa auxiliada pelo sistema cama de pedra [31].	23
Figura 2.9 - Ventilação mecânica: interior (esquerda) e exterior (direita) (adaptado de [11]).	24
Figura 2.10 - Sistema de arrefecimento evaporativo [11].	25
Figura 2.11 - Distribuição de temperaturas do solo com o aumento da profundidade ao longo de um ano [44].	28
Figura 2.12 - Esquema do princípio de funcionamento [57].	32
Figura 2.13 - Esquema ilustrativo do sistema aberto [55].	33
Figura 2.14 - Esquema ilustrativo do sistema fechado [55].	34
Figura 2.15 - Configurações horizontais em sistemas de circuito fechado [60].	35
Figura 2.16 - Configuração vertical em sistemas de circuito fechado [60].	36
Figura 2.17 - Esboço do sistema elaborado por Sharan et al. [75].	40
Figura 2.18 - Esquemática do teste experimental elaborado por O. Ozgener, L. Ozgener [72].	41
Figura 2.19 - Projeto de climatização em edifício elaborado por Khabbaz et al. [66].	42
Figura 2.20 - Pormenor da distribuição do ar “Coolhouse Project” [77].	43

Figura 2.21 - Sistema de arrefecimento do edifício Solar XXI [78].	44
Figura 3.1 - Localização do permutador de calor ar-solo.	46
Figura 3.2 - Esquema do permutador de calor ar-solo. Adaptado de [53].	47
Figura 3.3 - Esboço e dimensões da estufa.	48
Figura 3.4 - Fotografia da estrutura da estufa	49
Figura 3.5 - Fotografia dos pormenores de fixação com o tubo de aço	49
Figura 3.6 - Fotografia do pormenor de fixação com varão dobrado	50
Figura 3.7 - Fotografia da preparação para corte do plástico	50
Figura 3.8 - Fotografia das partes de fixação do plástico	51
Figura 3.9 - Fotografia do sistema de fixação do plástico.	51
Figura 3.10 - Fotografia da distribuição do sistema de fixação do plástico	52
Figura 3.11 - Fotografia da estufa completa.	53
Figura 3.12 - Data logger PCE-T 1200 (PCE instruments) [81].	54
Figura 3.13 - Data logger EL-USB-1-LCD (Lascar Electronics) [82].	54
Figura 3.14 - Recetor E2 Classic Electricity Monitor e respetivo transmissor [83].	55
Figura 3.15 - Anemómetro Testo 416 [84].	55
Figura 3.16 - Ventilador TD-800/200 (S&P) [85].	56
Figura 3.17 - Ventilador TD-250/100 T (S&P).	56
Figura 3.18 - Termoventilador com termostato da marca Equation.	57
Figura 3.19 - Esquema da instalação experimental.	57
Figura 3.20 - Fotografia dos acessórios de ligação entre saída permutador e tubo isolado (esquerda) e acessórios de ligação entre permutador, ventilador e tubo isolado (direita)	58
Figura 3.21 - Fotografia da flange com canhão fixada na estufa	59
Figura 3.22 - Fotografia frontal da instalação	59
Figura 3.23 - Fotografia lateral da instalação	60
Figura 3.24 - Localização geográfica das sondas	62

Figura 3.25 - Esquema das sondas implementadas [53].....	63
Figura 3.26 - Localizações dos termopares no permutador de calor [53].....	63
Figura 3.27 - Localização dos termopares na estufa	64
Figura 3.28 - Fotografia do pormenor de fixação do data logger na estufa	64
Figura 3.29 - Fotografia do pormenor de proteção de radiação solar do data logger	65
Figura 3.30 - Fotografia do pormenor de fixação do data logger da temperatura ambiente ..	66
Figura 3.31 - Fotografia da proteção do data logger da temperatura ambiente	66
Figura 3.32 - Fotografia da adição de tubo PVC ao ventilador da estufa de controlo	68
Figura 3.33 - Fotografia do ventilador implementado na estufa de controlo	69
Figura 3.34 - Fotografia do segundo ventilador no permutador de calor	69
Figura 3.35 - Fotografia do pormenor das restrições de caudal	70
Figura 4.1 - Temperatura do solo ao longo da profundidade no local A - “Reitoria Baixo”	74
Figura 4.2 - Temperatura do solo ao longo da profundidade no local B - “Reitoria Cima”	75
Figura 4.3 - Temperatura do solo ao longo da profundidade no local C - “Engenharias”	76
Figura 4.4 - Temperaturas no ensaio A1	77
Figura 4.5 - Temperaturas no ensaio A2	78
Figura 4.6 - Temperaturas no ensaio A3	79
Figura 4.7 - Temperaturas no ensaio A4	80
Figura 4.8 - Potência e COP do permutador de calor no ensaio A1	81
Figura 4.9 - Potência e COP do permutador de calor no ensaio A2	81
Figura 4.10 - Potência e COP do permutador de calor no ensaio A3	82
Figura 4.11 - Potência e COP do permutador de calor no ensaio A4	82
Figura 4.12 - Gráfico do consumo dos termoventiladores no ensaio B5.....	83
Figura 4.13 - Gráfico do consumo dos termoventiladores no ensaio B6.....	84
Figura 4.14 - Gráfico do consumo dos termoventiladores no ensaio B7.....	85

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Algumas características de matérias de cobertura. Adaptado de [21].	14
Tabela 2.2 - Coeficiente de transferência de calor. Adaptado de [11].	17
Tabela 2.3 - Propriedades de alguns tipos de solo e materiais. Adaptado de [52].	30
Tabela 3.1 - Tabela das características dos ensaios.....	67

Lista de símbolos

A	Área	m^2
c_p	Calor específico a pressão constante	kJ/kgK
d	Diâmetro	m
I	Intensidade da radiação solar	W/m^2
\dot{m}	Caudal mássico	kg/s
Q	Energia	J ou kWh
\dot{Q}	Potência térmica	W
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
U	Coeficiente médio de transferência de calor na estufa	$\text{W/m}^2\text{K}$
v	Velocidade	m/s
\dot{W}	Potência térmica	W

Símbolos Gregos

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

Lista de Acrónimos

ACCFHES	Aquifer Coupled Cavity Flow Heat Exchanger System
CFIUTE	Centro de Formação Integração UBI Tecido Empresarial
COP	Coefficient of Performance
EAHE	Earth to Air Heat Exchanger
EAHES	Earth to Air Heat Exchanger System
IEA	Internacionnal Energy Agency
PE	Polietileno
PVC	Policloreto de Vinilo
UBI	Universidade da Beira Interior

Capítulo 1

1. Introdução

Neste capítulo introdutório, cujo propósito é a contextualização do tema na presente dissertação, são abordados todos os aspetos relacionados com o enquadramento, o problema em estudo, os objetivos e a estrutura da dissertação. Pretende-se assim explicar, de forma breve e introdutória, a importância do estudo em questão, a sua motivação e fins a atingir.

As estufas estão em franco crescimento, não só devido ao aumento da população mundial e ao seu consumismo, mas também por conseguirem criar as condições ideais para o crescimento de uma determinada planta. As vantagens são inequívocas, pois possibilitam a produção de plantas não predominantes da região da instalação bem como o seu rápido desenvolvimento.

Para a criação do ambiente desejável na estufa é gasta energia, proveniente maioritariamente através da queima de combustíveis fósseis, assim é importante estudar formas alternativas para a climatização de estufas agrícolas através de fontes renováveis, como é o caso do presente estudo, em que se pretende avaliar a performance de um permutador de calor enterrado na superfície terrestre para climatização de uma estufa agrícola.

1.1. Relevância e enquadramento no tema

Existe uma urgente corrida para a diminuição do aquecimento global, as alterações climáticas são reais e se não se tomarem medidas conscientes e eficazes o planeta pode chegar a um ponto sem retorno. O aquecimento global deve ser o principal foco da humanidade, pois é muito por culpa do ser humano que estamos perante esta realidade, pelo seu consumismo e o uso e abuso dos combustíveis fósseis. Assim, hoje em dia, é necessário o estudo e a implementação de sistemas que não só substituam os convencionais combustíveis fósseis mas que também sejam energeticamente eficientes.

Segundo a International Energy Agency (IEA), o consumo global de energia cresceu 2,3% em 2018, aumentou quase o dobro da taxa média de crescimento desde 2010, impulsionado por uma economia global robusta e por maiores necessidades de climatização em algumas partes do mundo. A procura por todos os tipos de combustíveis aumentou, liderada pelo gás natural, mesmo quando a energia solar e eólica registaram um crescimento de dois dígitos. A maior procura de eletricidade foi responsável por mais da metade do crescimento das necessidades energéticas mundiais. O crescimento da eficiência energética em sistemas e em edifícios resultou numa melhoria ofuscada, pois devido ao maior consumo de energia, as emissões de CO₂ aumentaram 1,7% no ano 2018 e bateram um novo recorde. Os maiores ganhos vieram do

gás natural, que emergiu como o combustível de escolha, sendo responsável por quase 45% do aumento. A procura por todos os combustíveis aumentou, com os combustíveis fósseis a atingirem quase 70% do crescimento pelo segundo ano consecutivo. As energias renováveis cresceram a um ritmo de dois dígitos, mas ainda não foram rápidas o suficiente para responder ao aumento da procura por eletricidade em todo o mundo. Como resultado do maior consumo de energia, as emissões globais de CO₂ relacionadas à energia aumentaram 1,7 %. A produção de energia através da queima de carvão continua a ser o maior emissor individual, respondendo por 30 % de todas as emissões de dióxido de carbono relacionadas à energia. As condições climáticas no ano de 2018 também foram responsáveis por quase um quinto do aumento da procura global de energia, já que as temperaturas médias de inverno e verão, em algumas regiões, aproximaram-se ou excederam os registos históricos. Dias excessivamente frios aumentaram a procura por aquecimento e temperaturas demasiado quentes no verão fizeram crescer a procura por arrefecimento [1].

Já na Europa, a Comissão Europeia revela que 50 % da energia gasta é utilizada na climatização de habitações ou espaços industriais e que 84 % dessa energia, continua a ser gerada através de combustíveis fósseis. Segundo o programa nacional para as alterações climáticas, a meta estabelecida para o ano de 2030 na redução dos gases de efeito de estufa, é de menos 30 a 40 %, relativamente ao ano 2005. Neste sentido é imprescindível o empenho de todas as entidades e pessoas para a diminuição da “pegada” de carbono e atingir a descarbonização total até 2050, uma meta anunciada pela Comissão Europeia [2].

Energia, economia e meio ambiente são três fatores importantes para definir o comportamento dos sistemas de produção agrícola. Nos últimos anos, houve um grande aumento no consumo de energia na agricultura, devido ao crescimento contínuo da população e ao desenvolvimento de novas tecnologias de produção. A produção em estufas, um dos sistemas de produção de plantas mais intensivos, é o ramo de maior consumo de energia na agricultura. Os produtores são confrontados com o alto custo das operações envolvidas no processo de produção em estufas. Assim, é de grande importância definir todos os consumos energéticos na produção, a fim de encontrar a combinação ideal que possibilite esse trabalho mais eficiente em termos energéticos [3]. Um dos maiores gastos de energia em estufas é na sua climatização, principalmente no inverno em que existe um alto custo de aquecimento devido às baixas temperaturas. No entanto, a grande maioria das estufas não tem sistema de controlo climático, o aquecimento é caro e os preços de mercado dos produtos extraídos dessas estufas são muito baixos para compensar o uso de aquecimento [4]. A maioria dos produtores usa o carvão como fonte de combustível, pois é o mais barato e tem um alto poder calorífico [5]. O custo em aquecimento representa cerca de 30 % do total de despesas de operação de uma estufa, consequentemente, este gasto provou ser proibitivo o uso de sistemas de aquecimento em muitas aplicações. A falta de aquecimento numa estufa tem um importante efeito sobre o rendimento, qualidade e o tempo de cultivo dos produtos [6]. Não só pelas razões

anteriormente mencionadas, mas também por estratégias de negócio, os produtores procuram há muito alternativas para antecipar o calendário de produção, sendo o aquecimento das estufas a opção mais viável [7].

Para superar estes problemas tem primordial importância a utilização de tecnologias alternativas de aquecimento de baixo custo e eficientes, bem como, o estudo e desenvolvimento de técnicas que permitam não só reduzir o consumo energético como também reduzir a poluição. A utilização de permutadores de calor ar-solo representa assim uma das soluções para a climatização de estufas agrícolas, utilizando uma fonte de energia renovável que consequentemente evita a emissão de gases poluentes para a atmosfera. Os permutadores de calor ar-solo utilizam a energia térmica da camada superficial da terra para efetuar trocas de calor, utilizando o ar como fluido de trabalho. O ar é direcionado para o interior das tubagens do permutador, que se encontra enterrado no solo, e enquanto o ar circula dentro delas vai sendo efetuada a permuta de calor entre ar e solo, sendo o ar posteriormente enviado para o espaço que se deseja climatizar.

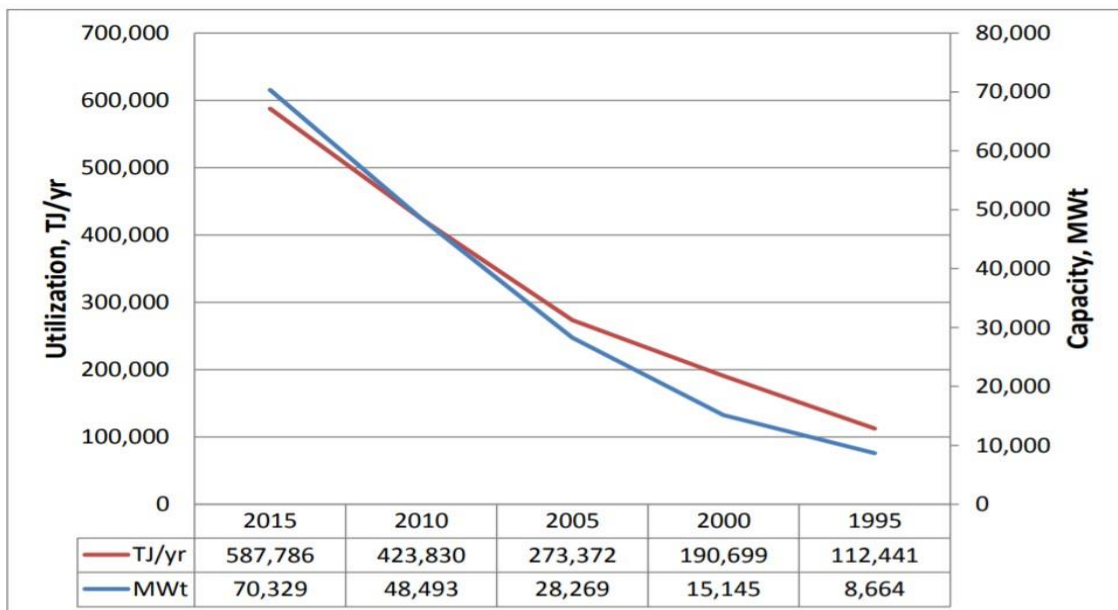


Figura 1.1 - Instalação mundial de energia geotérmica e utilização anual de 1995 a 2015 [8].

O uso direto da energia geotérmica é um dos métodos mais antigos, versátil e a forma mais comum de utilizar a energia térmica terrestre. A camada superficial terrestre tem a capacidade de manter uma temperatura aproximadamente constante, a relativamente baixas profundidades, que possibilita a utilização de meios para extrair essa potente fonte de energia. A energia geotérmica tem visto o seu número de instalações subir gradualmente e é utilizada mais frequentemente nas bombas de calor e no aquecimento de água para banhos e piscinas [8].

1.2. Objetivos e contribuição da dissertação

O tema em estudo tem o objetivo, em termos globais, de analisar o desempenho de um permutador de calor ar-solo na climatização de uma estufa agrícola, mas também recolher dados de sondas enterradas em três locais distintos, de modo a analisar as temperaturas na superfície terrestre. Esmiuçando, pretende-se concretamente analisar as diferenças térmicas e consumos energéticos entre duas estufas exatamente iguais, estufa de teste e estufa de controlo, situadas no mesmo local, ou seja, sob as mesmas condições ambientes, estando a estufa de teste acoplada a um permutador de calor ar-solo que aproveita a excelente inércia térmica do solo.

Este estudo revela-se inovador e contributivo, em relação aos muitos encontrados na literatura, na medida que faz a comparação entre uma estufa com e sem permutador de calor, sob as mesmas condições ambientes, a cada intervalo de tempo. A cidade da Covilhã tem condições ótimas para este estudo ao apresentar temperaturas negativas no inverno e temperaturas que ultrapassam os 40 °C no verão. O estudo contribui também positivamente para o conhecimento e desenvolvimento da agricultura regional, que grande peso tem para a economia da Beira Interior, visto que a região, conhecida pelos seus invernos rigorosos, tem grandes dificuldades em manter-se competitiva com outras zonas pois os gastos com aquecimento serão sempre superiores. O permutador de calor ar-solo pode então ser um sistema de auxílio à climatização de uma estufa agrícola que poderá reduzir os custos de climatização e revelar-se assim importante para a competitividade agrícola regional.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos que pretendem demonstrar o trabalho realizado, criando uma certa ordem cronológica de acontecimentos do mesmo. O primeiro capítulo é meramente introdutório, explicando o tema, a relevância do mesmo e os seus objetivos.

No seguinte capítulo, o segundo, anuncia-se em conjunto os fundamentos teóricos e a revisão bibliográfica, caracterizando as estufas, o potencial térmico do solo e o permutador de calor ar-solo.

O terceiro capítulo destina-se a descrever toda a instalação experimental, referindo todo o equipamento utilizado, processo de construção e também a metodologia seguida, explicando e apoiando a tomada de decisões.

O quarto capítulo será dedicado à apresentação, análise e discussão de resultados de todo o tipo de ensaios realizados.

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões gerais do trabalho efetuado, ao recordar e rever toda a dissertação e retirar as principais conclusões. São também propostas sugestões para futuros trabalhos a desenvolver.

Capítulo 2

2. Fundamentos teóricos e revisão bibliográfica

2.1. Introdução

No presente capítulo vai ser efetuada toda a fundamentação teórica e incorporada a revisão bibliográfica onde se apresentam diferentes trabalhos, de diversos autores, que serviram de base à realização da presente dissertação. Toda a construção e metodologia necessária foi baseada em aspetos teóricos, pretendendo assim obter o máximo desempenho possível nos aspetos práticos. No entanto, teoricamente a dissertação assenta em dois grandes temas, o permutador de calor ar-solo e a estufa.

A superfície terrestre tem a característica de manter a temperatura aproximadamente constante, durante todo o ano, devido à grande inércia térmica do solo. As amplitudes térmicas reduzidas, a profundidade suficiente, permitem que se obtenha sempre maior temperatura no solo que no ar ambiente no inverno, e no verão em que o ar ambiente é mais quente, as temperaturas na camada superficial terrestre são mais baixas.

Já a tecnologia de efeito estufa, geralmente usada para viabilizar a produção agrícola, depende de fatores ambientais, como temperatura ambiente, luz solar, humidade, etc. Atualmente, o aquecimento e o arrefecimento de estufas são obtidos com o uso de vários sistemas de climatização. Neste contexto, o sistema de climatização passiva através do solo é de grande potencial para as estufas, e vai ser alvo de revisão neste capítulo.

2.2. Estufas agrícolas

A horticultura em estufa é uma forma intensiva de produção agrícola em relação ao uso de mão de obra e capital investido. Desenvolveu-se como resultado do avanço tecnológico e do aumento da procura por produtos mais caros, fora de época e exóticos, relacionados ao aumento da prosperidade de um grupo crescente de cidadãos. O cultivo em estufas pode ser considerado a forma mais intensiva e avançada de produção agrícola, é frequentemente descrita como a "indústria de estufa", que demonstra o papel importante da tecnologia em todo o processo. Em comparação com o cultivo a céu aberto, as estufas oferecem a possibilidade de aumento de produção e maiores rendimentos devido ao controlo de doenças, clima e uso de água eficiente [4].



Figura 2.1 - Estufas agrícolas de Almeria, Espanha [9].

A produção de estufas teve a sua origem no norte da Europa, e a experiência estimulou o seu desenvolvimento em outras áreas do globo, incluindo o Mediterrâneo, América do Norte, Oceânia, Ásia e África com vários graus de sucesso. A experiência mostrou que uma mera transposição de tecnologias do norte da Europa para outras partes do mundo e diferentes ambientes agroecológicos não é um processo válido, as tecnologias devem ser adaptadas para atender aos requisitos locais e são necessárias pesquisas adicionais em cada meio ambiente.

As estufas apareceram na tentativa de adaptar o ambiente às necessidades de produção vegetal por meio de estruturas de proteção nos tempos ancestrais. Por fim do Império Romano, desapareceram essas técnicas antigas para o cultivo protegido, reaparecendo no final do século 18 na Inglaterra, França e Holanda. No entanto, o uso de estufas para produção comercial começou no meio do século 19 e aumentou rapidamente após 1945 [10]. Nos últimos 20 anos, houve uma revolução na produção de estufas em termos de projeto de estrutura, tipo e qualidade dos materiais de cobertura, manipulação nutricional das plantas, técnicas de poda, controlo de pragas integrado, uso de insetos polinizadores, controlo climático, solarização do solo e outras tecnologias. Apenas há alguns anos atrás, uma produção de tomate de 100 toneladas por hectare numa estufa era considerado um bom desempenho, hoje em dia, 600 toneladas por hectare não é incomum em estufas de alta tecnologia, mostrando o constante desenvolvimento imposto nas estufas [11]. Em 2011 a área total de estufas era cerca de 623 302 hectares, o continente asiático tem a maior concentração de estufas plásticas do mundo, a segunda maior está localizada na bacia do mediterrâneo que inclui vários países do sul da Europa (por exemplo, Espanha, França, Itália, Portugal, Grécia) e países do norte da África (por exemplo, Marrocos, Egito) e do Médio Oriente (Israel, Turquia) [12]. A título de curiosidade, a região de Almeria em Espanha, figura 2.1, é considerada a maior concentração de estufas do mundo, cobrindo uma área de 50 000 hectares [9].

Country	ha ('000)	Country	ha ('000)
China	81.0	Argentina	2.2
Spain	70.4	Chile	2.1
South Korea	47.0	Jordan	2.0
Japan	36.0	Belgium	1.6
Turkey	33.5	Russia	1.4
Italy	25.0	Germany	1.4
Morocco	16.5	Australia	1.3
France	10.0	Tunisia	1.3
Poland	5.2	Romania	1.3
Hungary	5.4	Egypt	1.2
Algeria	5.0	Canada	1.2
Greece	5.0	Bulgaria	1.1
Netherlands	4.6	Libya	1.0
Columbia	1.2	Serbia/Montengr.	1.0
Mexico	4.3	Lebanon	1.0
Israel	4.0	Brazil	1.0
Iran	4.0	United Arab Emir.	0.8
Palestine	3.3	India	0.7
Syria	3.1	New Zealand	0.7
Ukraine	2.7	United Kingdom	0.7
Ecuador	2.7	USA	0.7
Portugal	1.5	Moldova	0.5

Figura 2.2 - Maiores áreas de produção de hortícolas em estufas em todo o mundo [12].

2.2.1. Tipos de estufas

Todos os principais tipos de estufas têm vantagens e desvantagens funcionais e estruturais importantes. A escolha de um tipo de estufa pelo produtor depende das condições técnicas, legais e económicas locais. Em muitos casos, a tradição local e a necessidade de compatibilidade com as estufas existentes desempenham um papel importante na tomada de decisões, em particular as questões monetárias. Também o mercado aberto europeu e internacional influenciam fortemente a popularidade de certos tipos de estufa. No entanto, as características climáticas da região têm sido o fator condicionante do tipo de estufa e o seu desenvolvimento [13].

As estufas podem-se classificar quanto às suas características de construção e formato. Existem vários tipos de estufa, no entanto apenas se apresentarão neste texto os principais e mais utilizados, como a estufa de vidro e plástico rígido, a estufa em túnel baixo de plástico e a estufa de plástico filme.

As estufas de vidro e plástico rígido, são maioritariamente usadas no norte da Europa e apresentam algumas vantagens, tais como, menor degradação face a eventos naturais e agroquímicos, baixa transmissão de radiação térmica e alta visibilidade de luz solar.

De outro modo, o tipo túnel baixo de plástico é usado essencialmente num período de colheita, protegendo as plantas contra baixas temperaturas, vento, chuva, aves e insetos. Possui a

vantagem de ser de fácil construção e pouco dispendiosa, no entanto, como aspetos negativos tem o facto de ter baixa capacidade de aquecimento e não ter ventilação.

Já a estufa de plástico filme, é usada principalmente em países com um clima quente, este tipo de estufa é mais barato que as estufas de vidro, no entanto tem como principais desvantagens a degradação do plástico, requerer muita mão de obra na sua montagem e pouca resistência a tempestades. Estes tipo de estufas são usadas em toda a parte do mundo, desde simples estruturas de madeira a complexos túneis arqueados, apresentando muitas variantes, sendo as principais descritas seguidamente. Começo por apresentar a forma mais simplista de estufas de plástico filme, a estufa em túnel. A estrutura é constituída por barras e cabos de aço, tem a desvantagem de o plástico se romper por fricção em contacto com os cabos de aço e como vantagem o facto de ser de montagem simples. Outra variante são as estufas tipo telhado, usadas um pouco por toda a parte do mundo, utilizam na sua estrutura base materiais como a madeira, aço ou betão, no entanto, o telhado é constituído essencialmente por madeira o que dificulta o deslizamento do plástico sobre o telhado. A mais conhecida e utilizada variante é a estufa de telhado em arco, com estrutura feita em aço tubular, a sua forma arredondada tem a vantagem de não reter a condensação interior no seu topo, fluindo mais facilmente para as laterais da estufa, vantagem essa também aplicável nos casos de queda de neve, neste caso, no exterior da estufa. Aberturas no topo ou nas laterais da estufa proporcionam a ventilação. Esta estufa de telhado em arco pode, noutra variante, ser coberta com um plástico filme duplo, onde o espaço entre as duas películas é insuflado, permitindo obter grande capacidade de isolamento, esta é utilizada maioritariamente em climas muito frios [10].

2.2.2. Aspetos construtivos

As estufas são preferencialmente construídas a partir de materiais facilmente disponíveis. Madeira, bambu e aço são geralmente adequados para a sua construção. Estufas de vidro e plástico rígido são geralmente feitas de alumínio ou aço. A escolha do material de construção depende dos preços locais. A madeira é o material de construção mais barato em muitos países, no entanto, tem a desvantagem de se degradar rapidamente. O aço deve ser protegido contra a corrosão, geralmente galvanizado com zinco, mas drenado pela água de rega pode causar problemas de poluição ambiental. O alumínio, no entanto, é resistente à corrosão, é leve, mas tem a desvantagem de ser caro [13]. O projeto da estufa influencia não só o comportamento estrutural, mas também fatores do clima interno tais como a temperatura, humidade e transmitância de luz. Desta forma, o projeto de estufas deve seguir as regulamentações relacionadas com as condições climáticas locais [10]. Em Portugal o dimensionamento de estufas rege-se pela norma europeia 13031-1 de Dezembro de 2001: “Greenhouses: Design and construction - Part 1: Commercial Production Greenhouse” [14].

2.2.2.1. Estruturas

As estufas são estruturas leves, que devem ter alta transmitância de radiação solar para obter um maior crescimento da planta, tem assim de haver um compromisso entre esbelteza e resistência. As estruturas devem ser capazes de suportar carregamentos devido ao vento, chuva, granizo e neve, bem como cargas permanentes, impostas e de serviço. Danos a estufas, são causados maioritariamente por tempestades e fortes nevões, pois os principais componentes estruturais não são projetados para suportar essas cargas extra. Para que as estufas satisfaçam margens de segurança suficientes e para evitar danos graves, a estrutura da estufa deve ser concebida em conformidade com padrões relevantes. As principais cargas, que devem ser levadas em conta no dimensionamento da estufa, são:

- carga morta ou carga permanente
- cargas impostas (cargas de colheita)
- instalações
- cargas de neve
- cargas de vento
- carga sísmica [10].

2.2.2.2. Altura da estrutura

A altura de uma estufa altera o seu volume, por consequência o ambiente interno reage a essas mudanças, portanto, estufas com um elevado volume, resultam numa resposta lenta do seu microclima interior às mudanças nas condições externas. As estufas com maior altura têm também maior consumo de energia e são mais exigentes em termos de estabilidade estrutural devido às cargas de vento serem maiores. A altura de uma estufa é otimizada tendo esses dois fatores em consideração. Estufas altas têm outras vantagens importantes, por exemplo, a eficiência da ventilação é maior, uma vez que as diferenças de pressão ao longo dos telhados altos é elevada, devido a velocidades mais rápidas do vento, enquanto o efeito chaminé induzido pela ventilação lateral e do telhado é aumentado. Além disso, as estufas com maior altura permitem mais espaço para os sistemas de climatização, iluminação ou vaporização. Por estas razões, a tendência é para a construção de estufas com mais altura [10].

2.2.2.3. Fundação e ancoragem

As fundações das estruturas das estufas devem sustentar a combinação das diferentes cargas e transmiti-las com segurança para o chão. Devido ao facto da estrutura das estufas ser leve, é dada especial atenção à capacidade de as fundações resistirem às forças de elevação criadas pela ação do vento. Para blocos de fundação de betão, a máxima carga vertical ascendente não deve exceder o peso das fundações. Para estufas de baixo valor, como a de túneis, a fundação

da estrutura é obtida com ancoragem leve, passando tubo estrutural pelo chão em que o arco é conectado à estrutura da estufa por meio de parafusos [10].

2.2.2.4. Material de revestimento

As propriedades do material de revestimento influenciam a qualidade do ambiente interior da estufa, assim, as propriedades mecânicas influenciam o projeto estrutural e o comportamento mecânico da estufa. Por exemplo, estufas revestidas com vidro normalmente têm telhados inclinados, enquanto estufas revestidas com filme plástico podem ter telhados inclinados ou telhados arqueados. Por esta razão, os aspectos funcionais da estrutura das estufas influenciam não só a transmissão da radiação solar, conservação de energia e ventilação, mas também a forma como se realiza a condensação, ou o próprio comportamento do solo, o que irá impor requisitos de projeto nas estruturas das estufas. O vidro é um bom material, possui uma vida útil de 25 anos ou mais e tem baixos custos de manutenção, mas é dispendioso. Quanto às suas características, tem elevada transmitância, alta absorção de radiação infravermelha e bom comportamento em relação à condensação na superfície. As principais desvantagens do vidro são a fragilidade, a insegurança para os trabalhadores, a necessidade da estrutura da estufa ser mais complexa, em que os elementos por vezes são de grandes dimensões, criando bloqueios à luz. O revestimento plástico é muito utilizado em países com climas quentes, tem baixo custo, é leve e de fácil aplicação pois pode ser ajustado em várias estruturas de estufa e tem alta transmitância de radiação solar e bom isolamento. O revestimento pode ser feito através de placas rígidas ou rolos de plástico com espessuras finas, no entanto, tem algumas desvantagens, como a curta longevidade e quando os filmes não são bem esticados e fixados à estrutura, podem criar vibrações que poderão desencadear graves problemas estruturais [10].

2.2.2.5. Localização, orientação e radiação

O sol providência energia para o crescimento das plantas e geralmente é um factor limitador no desempenho das estufas. Quando se planeia a construção de uma estufa deve-se dar primazia à obtenção da máxima luz solar durante os dias curtos de inverno [15]. A intensidade da radiação solar incidente é então considerado um parâmetro importante e influenciador do clima interior bem como da atividade fotossintética das plantas. A estrutura da estufa e o material de cobertura são responsáveis por perdas de radiação solar. Especificamente, a radiação global transmitida é reduzida por absorção e reflexão no material de cobertura, sombreamento por componentes estruturais da estufa, sujidade e condensação no material de cobertura. A transmitância da radiação solar é influenciada pela orientação da estufa e elevação do sol, entre outros fatores [16]. A transmissão de luz aumenta com a inclinação do telhado e a sua orientação, é maior para este - oeste no inverno e no verão é maior para a orientação norte - sul. De salientar também que as estufas com telhados curvos têm melhor transmissão de luz que as estufas com um telhado inclinado. Deve-se evitar a construção de estufas perto de edifícios, árvores grandes e outras obstruções que possam fazer sombreamento às estufas.

Como regra geral, a estufa deve estar afastada a pelo menos 2,5 vezes a altura de um objeto que possa fazer sombra, para orientação este, oeste ou sul [15]. Este aspeto é importante pois mesmo pequenos objetos a que não se dê importância, podem produzir uma longa sombra de manhã quando o sol se encontra particularmente “baixo”. Outro critério a ser considerado na orientação da estufa é o da incidência do vento na sua localização, através da análise da direção do vento, poderá definir-se a orientação da estufa com o intuito de forçar a circulação de ar no seu interior, reduzindo assim gastos na climatização. No entanto, há que ter em conta que nas estufas, o vento é o principal responsável pelos danos nas estruturas, sendo necessário que na sua conceção se considerem todos os fatores [17].

2.2.2.6. Ventilação

A ventilação tem o intuito de renovar, substituir ou climatizar o ar no microclima interior, alterando inevitavelmente, temperatura, humidade e concentração de gases. Existem dois tipos: natural e mecânica. O tipo deve ser escolhido conforme o cultivo, género de edifício e as características do ambiente exterior. As aberturas de ventilação são elementos funcionais essenciais, a sua localização e design podem influenciar fortemente a qualidade do microclima interior e a eficiência energética. Como na maioria das estufas a renovação do ar interno é obtida exclusivamente por ventilação passiva, a idealização das aberturas deve permitir estratégias para melhorar a taxa de ventilação sob várias condições climáticas. A capacidade de ventilação é geralmente descrita pela razão de abertura, isso expressa a área máxima de abertura em relação à área de solo coberta. No entanto, a dimensão dos ventiladores é apenas um parâmetro que permite avaliar a eficiência da ventilação. Uma alta relação de abertura é apenas uma indicação da alta capacidade de ventilação, enquanto a forma, posição e a operação dos ventiladores também influenciam fortemente a taxa de renovação de ar. Os dois processos responsáveis pela ventilação passiva nos edifícios são o vento externo e a diferença de temperatura entre o interior e o exterior. Se a estufa estiver equipada com aberturas próximas ao nível do solo e do teto, esse tipo de ventilação substitui o ar quente interno por ar mais frio, durante os dias quentes, o ar frio externo entra através das aberturas inferiores enquanto o ar interno quente sai pelas aberturas localizadas no telhado [10].

2.2.3. Exigências, métodos e sistemas na climatização de estufas

O principal objetivo de uma estufa é obter o maior rendimento fora da época de cultivo, o que é possível mantendo a temperatura ideal em todas as fases de crescimento. Um sistema apropriado de aquecimento ou arrefecimento deve ser acoplado na estufa para este fim pois tem um impacto significativo no tempo de cultivo, qualidade e quantidade produzida [18]. A climatização regula também a concentração de dióxido de carbono, oxigénio, temperatura, humidade e até a luminosidade. O ambiente da estufa é influenciado principalmente por dois mecanismos: ventilação e radiação solar. A ventilação, falada na secção anterior, afeta diretamente os balanços de energia e massa de ar na estufa, velocidades de ar menores

provocam trocas de energia menores, então as trocas de energia mudam consoante as condições ambientes exteriores e aberturas nas estufas. O segundo mecanismo, a radiação, é dividida em duas partes, a radiação de ondas curtas emitida pelo solo e a radiação de ondas compridas emitidas pelo interior da estufa. A primeira é diminuída devido à intercetação da luz pela opacidade e transparência do material da cobertura, enquanto a segunda, radiação de ondas compridas, emitidas do interior da estufa, é influenciada pelas propriedades radiativas do material de cobertura da estufa. É assim importante a escolha de um material de cobertura para obter a melhor relação entre transparência e opacidade. [19]. Os materiais de cobertura devem favorecer a penetração da radiação solar e neutralizar a perda de radiação térmica interna. A energia incidente é obtida tanto da radiação solar direta como da radiação difusa da atmosfera, um céu claro tem de ser distinguido do céu nublado. A radiação térmica emitida do interior da estufa, é proveniente de corpos de acordo com a sua temperatura, que preenchem o espaço interno da estufa [20]. A transmitância, capacidade de a luz atravessar uma determinada matéria, ou a reflectância, parte da radiação recebida que é refletida, são importantes parâmetros a observar. Na tabela seguinte são mostradas, juntamente com esses parâmetros, algumas características de diferentes materiais comumente utilizados em cobertura de estufas.

Tabela 2.1 - Algumas características de matérias de cobertura. Adaptado de [21].

Caraterísticas	Materiais de cobertura			
	Polietileno (PE)	Policloreto de vinilo (PVC)	Vidro para estufas	Policarbonato (acrílico)
Transmitância	0,86	0,91	0,89	0,78
Reflectância	0,10	0,07	0,08	0,14
Condutibilidade térmica ($W m^{-1} K^{-1}$)	0,33	0,13	0,76	0,19
Espessura (mm)	0,10	0,10	4,00	10

Como foi dito anteriormente, o ambiente da estufa é influenciado principalmente por dois mecanismos, ventilação e radiação solar, no entanto, como mostra a figura seguinte, existem trocas adicionais de energia no interior de uma estufa, como a condensação, transpiração das plantas, evaporação, condução e convecção. Sublinho que grande parte destes mecanismos estão relacionados diretamente com as condições exteriores da estufa. Para não estarem inteiramente dependentes desses fatores naturais, os produtores agrícolas necessitam de recorrer a métodos adicionais para controlo do ambiente interior das estufas.

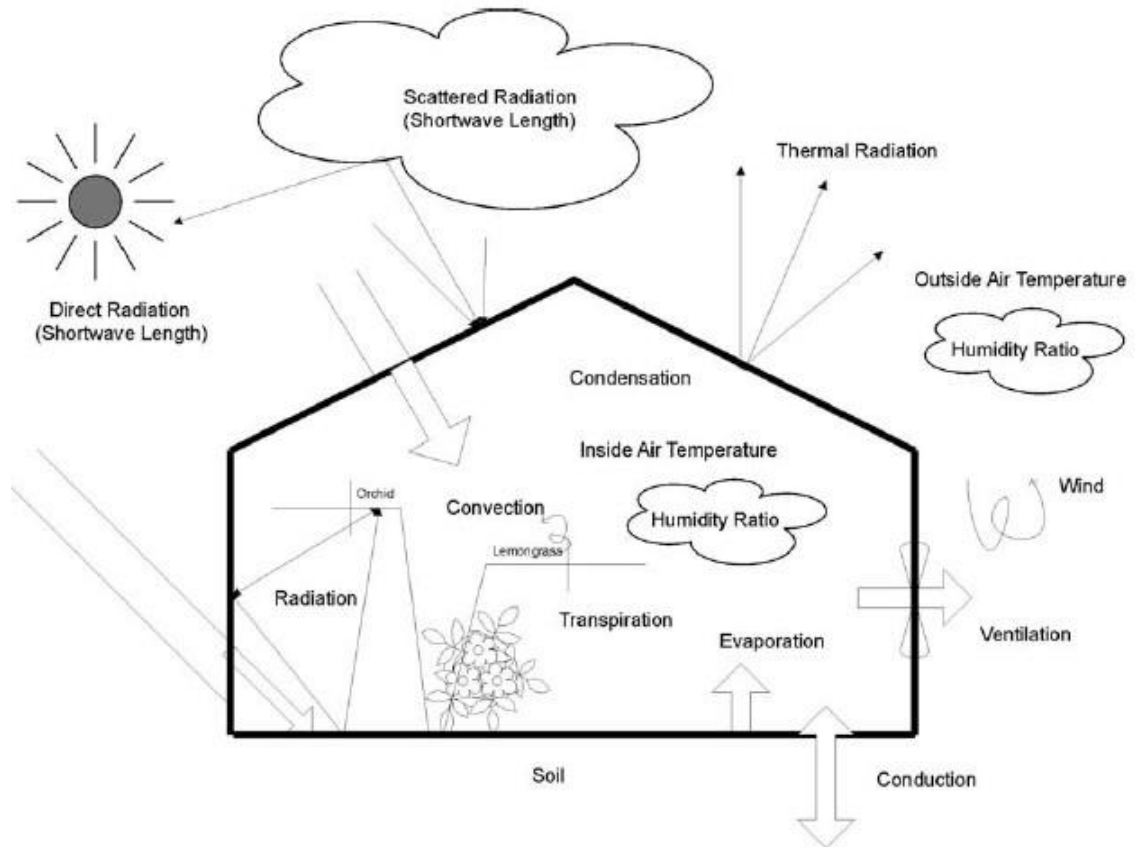


Figura 2.3 - Trocas de calor entre os vários componentes presentes numa estufa. Adaptado de [22].

O balanço de energia de acordo com a figura pode ser expressado da seguinte forma [19]:

$$Q_{total} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.1)$$

Em que:

- Q_{total} - Balanço de energia total [J];
- Q_{in} - Montante de energia que entra na estufa [J];
- Q_{out} - Montante de energia que sai da estufa [J].

Um modo simplista de cálculo da energia que entra na estufa é dado pela seguinte expressão que determina o total de energia recebida pelo sol [5]:

$$Q_{in} = I_0 A_r \eta_s \quad (2.2)$$

Onde:

- I_0 - Intensidade média diária da radiação solar [W/m^2];
- A_r - Área de telhado [m^2];
- η_s - Razão entre a energia solar e a energia aproveitada para aquecimento de estufa durante o dia, este valor é aceite como 0,5.

Já o total de energia perdida pela estufa pode ser determinado pela equação (2.3) [5].

$$Q_{out} = A_0 U (T_i - T_o) \quad (2.3)$$

Em que:

- A_0 - Área total de cobertura [m^2];
- U - Coeficiente médio de transferência de calor da estufa [W/m^2K];
- $T_i - T_o$ - Temperatura do interior e exterior da estufa, respetivamente, [$^{\circ}C$].

É de realçar que o valor do coeficiente médio de transferência de calor (U) depende de vários fatores como o tamanho da estufa, tipo de cobertura, aquecimento, velocidade do vento, entre outros. Não é assim possível determinar esse valor de forma precisa, no entanto existem valores de referência para vários tipos de estufa mostrados na tabela seguinte.

Tabela 2.2 - Coeficiente de transferência de calor. Adaptado de [11].

Material de cobertura	U (W/m ² K)
Vidro simples	6,0 - 8,8
Vidro duplo	4,2 - 5,2
Acrílico duplo (16 mm)	4,2 - 5,0
Plástico filme	6,0 - 8,0
Plástico filme duplo	4,2 - 6,0

O dimensionamento do sistema de aquecimento a ser aplicado na estufa surge a partir do cálculo da perda de calor da mesma [19], assim a energia necessária para aquecer um estufa pode ser calculada pela equação (2.3).

É possível encontrar muitos sistemas que possam satisfazer as condições básicas de climatização, porém, ao contrário do aquecimento para o qual a tecnologia é bem estabelecida e direta, o arrefecimento frequentemente apresenta problemas consideráveis. Uma compreensão adequada do comportamento térmico das estufas pode, exceto em condições extremas, levar ao uso de sistemas de arrefecimento que proporcionam um desempenho aceitável em todas as condições. A ventilação natural revela-se um bom sistema de climatização em muitos casos, já noutros exige a instalação de ventiladores maiores (ventilação mecânica) para auxiliar a circulação de ar, deste modo frequentemente dispensa outro tipo de climatização. Em regiões onde não se sentem verões extremos, é usado também em conjunto com a ventilação mecânica, um sistema chamado de sombreamento, para evitar a entrada de radiação solar que sobreaquece a estufa e não é necessária para o crescimento das plantas. Já nos locais com temperaturas máximas extremas, o arrefecimento evaporativo é o sistema mais eficiente para arrefecer uma estufa. A climatização pode ser classificada por equipamentos de aquecimento, arrefecimento e combinados, como se pode ver na figura seguinte, no entanto no próximo texto, focar-nos-emos apenas nos principais equipamentos utilizados de aquecimento e arrefecimento. [23].

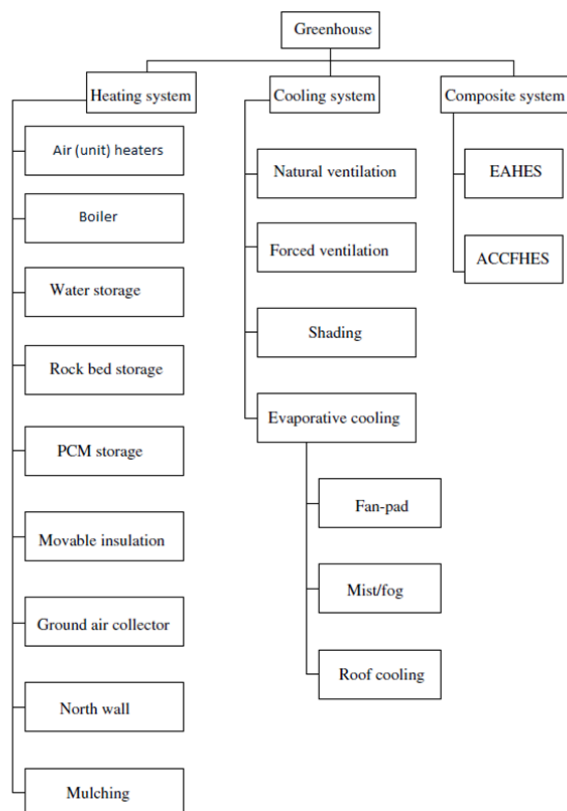


Figura 2.4 - Classificação de vários sistemas de climatização em estufas agrícolas [18].

2.2.3.1. Sistemas de aquecimento

Um sistema de aquecimento em estufas é usado para aumentar a energia térmica no interior da estufa ou para transferir o excesso de calor do seu interior para uma área de armazenamento, sendo depois recuperado à noite para satisfazer as necessidades de aquecimento da estufa [18]. Um dos sistemas de aquecimento mais convencionais e comerciais são as unidades de aquecimento de ar (Figura 2.5), em que a fonte de energia pode ser elétrica, óleo, querosene ou gás natural. O seu funcionamento consiste em ar soprado por unidades de aquecedor e ventilador para distribuição do ar, podendo ser montados no chão ou em suporte. Exigem um moderado investimento de capital, são fáceis de instalar e podem-se expandir facilmente, se necessário. Estão localizados em toda a estufa, cobrindo, cada um, uma área aproximada de 180 a 500 m². A principal desvantagem do sistema é a distribuição heterogénea de calor, contudo, pode ser contornado conectando ao aquecedor tubagem de polietileno distribuída por várias partes da estufa, havendo assim uma distribuição de calor mais homogénea. [11]



Figura 2.5 - Unidade de aquecimento de ar [11].

Outro sistema mais convencional e comercial, exemplificado na figura 2.6, é a caldeira em que a fonte de energia pode ir desde a madeira, resíduos ou gasóleo. O vapor ou água quente, produzido através da queima de combustíveis, é dissipado por toda a estufa através de um sistema de irradiação instalado em redor do perímetro da estufa. Em contraste com as unidades de aquecimento de ar, algum calor proveniente da caldeira é entregue à zona de raiz e crescimento da colheita, um ambiente quente e a baixa corrente de ar desenvolvida perto da superfície das plantas pode levar a um melhor crescimento da cultura.[11]



Figura 2.6 - Caldeira [11].

Um exemplo da aplicação de uma caldeira é demonstrado pelo estudo efetuado por Chau et al. em Vancouver (Canadá), que tinha como objetivo a análise técnico-económica da aplicação de uma caldeira a pellets e biomassa, numa estufa de tamanho médio. Os autores referem que, naquela região, as estufas costumam ser equipadas com duas ou três caldeiras, uma como fonte principal de fornecimento de calor e as outras de “backup”, sendo as caldeiras a gás natural as mais utilizadas devido ao seu investimento inicial reduzido e à sua eficiência. No entanto, devido à subida do preço do gás e à sua volátil alteração de preços, levou a que se considerassem combustíveis alternativos, como era o caso da biomassa e dos pellets. Como caso de estudo foi utilizada uma estufa com 7,5 hectares de área que usava uma caldeira a gás natural com 7,5 MW para fornecimento de calor e CO₂. Focando-se nas necessidades de aquecimento, notaram que a potência fornecida pela caldeira a gás natural era excessiva em alguns meses e períodos do dia. Instalaram assim uma caldeira a biomassa de 5 MW que assegurava 40 % das necessidades de aquecimento, enquanto a caldeira a gás natural os restantes 60 %. Neste modo de funcionamento, os resultados obtidos no estudo efetuado mostram que, para um período de 25 anos, com caldeira a pellets ou biomassa, se pode poupar 259 000 ou 1 104 000 dólares, respetivamente, evitando o lançamento de cerca de 3000 toneladas de CO₂ para a atmosfera [24].

Por último, no que diz respeito a dispositivos comerciais de aquecimento, outro tipo de sistema é a bomba de calor, designada em inglês por “Heat Pump”, representa um sistema que move o calor de um lugar para outro usando um compressor e uma estrutura de circulação do fluido refrigerante, seja ele líquido ou gasoso, através da qual o calor é extraído de fontes externas e bombeado para dentro da divisão a climatizar. Os sistemas de bomba de calor acabam por ser 3 a 5 vezes mais eficientes do que caldeiras de combustível fóssil [25]. Chou et al., em Banguecoque (Tailândia), determinaram o desempenho de uma bomba de calor no aquecimento, arrefecimento e desumidificação de uma estufa agrícola, através de um modelo analítico, com base em processos de transferência de calor. A estufa com 240 m² de área, exigia uma temperatura diurna de 27 °C, noturna de 18 °C e humidade relativa de 40 % para os seus tipos de plantações. Os autores referiram que um compressor com 3,7 kW para a bomba de calor, com uma capacidade de condensação e evaporação de 30 e 37 kW, respetivamente, são suficientes para manter as exigências requeridas pela estufa, sendo o COP calculado para a bomba de calor entre 1,2 - 4. Os autores explicaram que as condições do ar interior, são totalmente influenciadas pelas características do ar exterior, chegando a essa conclusão a partir das interações e trocas de energia entre os componentes da estufa e o ambiente exterior, através das infiltrações e ventilações. Ficou assim presente, que para as condições impostas era completamente viável a utilização de uma bomba de calor para a climatização de uma estufa agrícola [22].

Falando agora de outros sistemas de aquecimento, menos convencionas, começo por apresentar o sistema de armazenamento em água que consiste num sistema que absorve e armazena o

calor do interior da estufa, ou a radiação solar incidente, ao longo do dia e durante a noite o calor armazenado é devolvido para o ar ambiente da estufa por convecção natural e radiação. O meio de armazenamento de calor também pode ser colocado fora da estufa, caso em que um fluido de transferência de calor deve ser usado. Geralmente, o ar quente da estufa é transferido em forma de calor para a água armazenada (massa térmica) e posteriormente o processo é revertido através de um permutador de calor. O sistema de armazenamento também pode ser colocado no subsolo [18]. Entre 1984 e 1985, foi conduzida uma experiência sobre este assunto por M. Grafiadellis no Centro de Investigação da Agricultura do norte da Grécia que consistia em sistemas de armazenamento de água com capacidade para 80 m³, utilizados numa estufa com 1000 m². A água era armazenada em sacos de plástico transparentes, sob a forma de tubos, dispostos no solo entre as filas de plantas ou os tanques de água colocados ao longo da linha mais a norte da estufa. Estes dispositivos funcionavam como coletores solares, ao reterem na água, durante o dia, o calor proveniente da radiação solar. Durante a noite, o calor era libertado dos tubos através dos mecanismos de convecção natural e radiação. O autor refere que o melhor material para os tubos era polietileno de longa duração e os tubos de água devem preencher pelo menos 35 % da área da estufa e conterem 80 m³ de água por cada 1000 m² de área de estufa. Em cerca de 5 meses, o sistema criado pelo autor, armazenou uma energia de 93 204 800 kcal, equivalente a 11 650 l de gasóleo [26].

A energia Geotérmica é a única forma de energia renovável que é independente do sol [27], e como o próprio nome indica, o prefixo 'geo' que significa terra e o sufixo 'térmica' que significa calor, é a energia obtida a partir do calor proveniente do interior da superfície terrestre. O calor é transferido à superfície devido a movimentos da crosta terrestre, por intrusão de magma fundido e pela circulação de águas subterrâneas, formando reservatórios de água quente sob grande pressão [28]. As vantagens da energia geotérmica não são apenas a produção de eletricidade mas também a aplicação direta do calor na indústria e em usos domésticos, independentemente das condições meteorológicas [29]. Essa fonte de calor é utilizada em várias aplicações, estâncias termais, aquecimento de piscinas, casas ou aldeias e também estufas, prova disso foi um estudo levado a cabo por Bakos et al., na Grécia, onde foi estudado o desempenho térmico de uma estufa, aquecida através de uma fonte de energia geotérmica. A fonte geotérmica, com água à temperatura de cerca 100 °C, ficava situada no norte do país onde as temperaturas são mais baixas que no sul, atingindo uma média de cerca de 4 °C. O sistema de aquecimento prometia ser muito económico, necessitando apenas do apoio dos sistemas que utilizam combustíveis fósseis nos meses muito frios. A área total da combinação de estufas perfazia um hectare utilizado para a produção de flores. O sistema de transporte de calor era composto por 3 fases, primeiro por um permutador que fazia a troca de calor entre a água do circuito da estufa e água da fonte geotérmica, processo em que a água do circuito descia para 95 °C. Seguidamente, era dirigida por um tubo de aço com um total de 521 m que fazia descer a temperatura para 75 °C. Por fim terminava em quatro aeroventiladores que provocavam a descida de temperatura até aos 58,7 °C e enviavam o ar quente para o interior

da estufa. O sistema, com temperatura ambiente exterior de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, conseguia manter o ambiente interior da estufa a uma temperatura de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ [30].

Um sistema também amigo do ambiente e de simples aplicação é o chamado Parede Norte, representado na figura 2.7. Se a parede mais a norte da estufa for constituída por um material consistente e com boa capacidade de absorção de calor, construído em blocos, tijolos ou betão, a radiação solar incidente durante o dia é retida e depois libertada em forma de calor durante a noite. Este simples sistema é mais conhecido no hemisfério norte, nas estufas orientadas a este-oeste, dependendo da localização, este tipo de aquecimento é capaz de assegurar 82% das necessidades de aquecimento anuais das estufas [18].

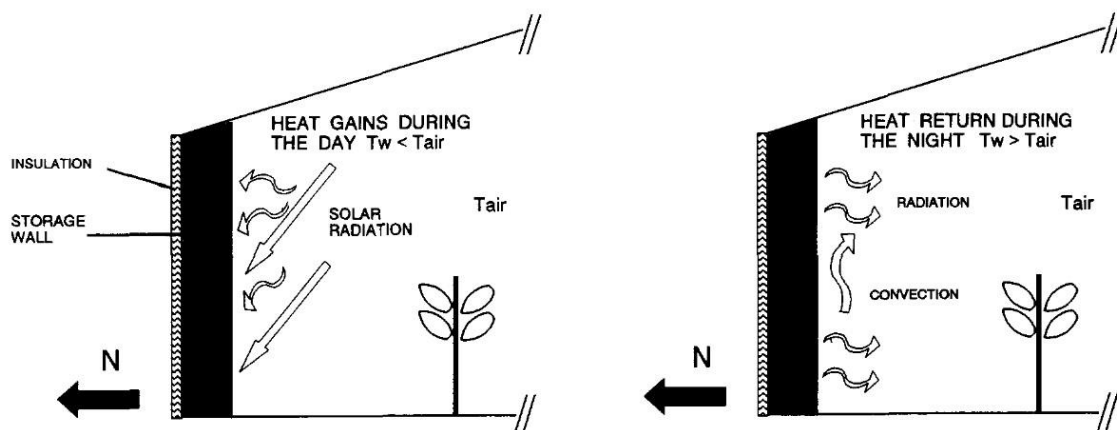


Figura 2.7 - Estufa com sistema de retenção de calor parede norte [31].

Utilizando este sistema, R. Singh e G. Tiwari, elaboraram um estudo analítico para o aquecimento do ambiente de uma estufa com uma área de 24 m^2 , num dia típico de frio em Nova Deli (Índia). O sistema usado para manutenção do ambiente interior da estufa era a integração entre uma parede de armazenamento de calor (North Wall) e um coletor de ar do solo. O sistema coletor de ar do solo, era baseado no princípio dos painéis solares em que a radiação solar aquecia a placa e, posteriormente, este calor era conduzido através do fluido que circulava nos tubos, sendo neste caso utilizado o ar, que ao passar no coletor era aquecido e libertado na estufa. Para validação do modelo teórico, foram também feitos ensaios experimentais. Foi observado que houve um efeito significativo no ambiente da estufa com a aplicação da parede de armazenamento de calor e o coletor de ar solo, permitindo aumentar a temperatura interior entre $5\text{-}6\text{ }^{\circ}\text{C}$ [32].

Um outro sistema popular e pouco dispendioso é o apelidado cama de pedra, figura 2.8. O armazenamento de calor colocado sob o solo tem a vantagem de fornecer uma superfície de transferência de calor grande e barata. Depósitos de rocha são colocados no subsolo a uma profundidade entre 40 e 50 cm, dentro ou fora da estufa [18].

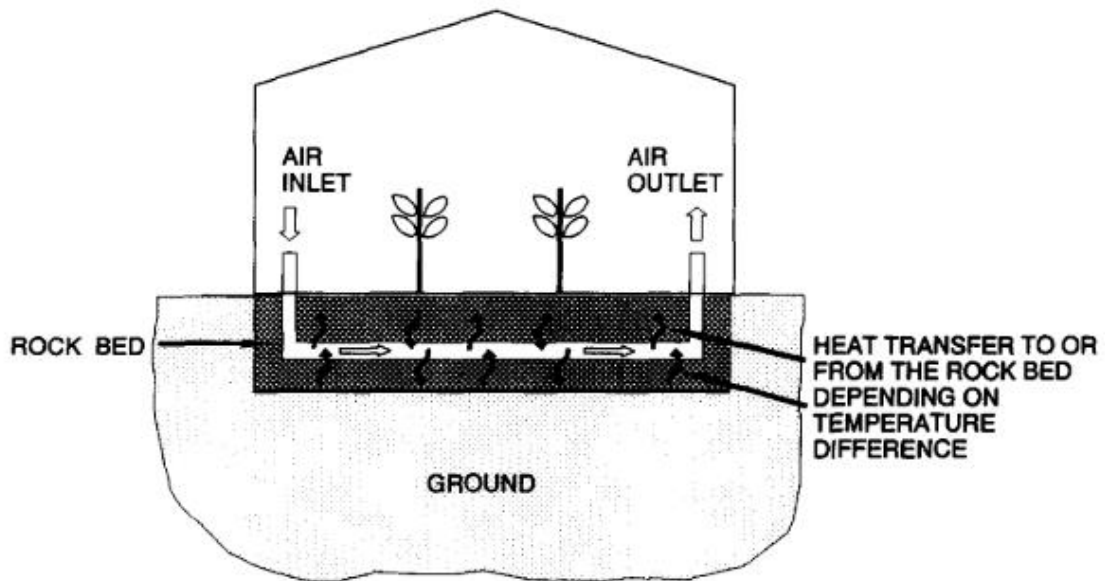


Figura 2.8 - Estufa auxiliada pelo sistema cama de pedra [31].

Este assunto foi estudado e aplicado por Kürklü et al. (2003) na Turquia num projeto que se baseava na análise de duas estufas com 15 m², estando numa delas instalado o sistema em questão. Neste projeto as rochas serviam de preenchimento a dois canais escavados e isolados no solo de uma das estufas, onde o calor era armazenado, sendo o ar o mecanismo de transporte. Durante o dia, o calor interior em excesso era transferido para as rochas, de noite invertia-se o processo, ou seja, o ar frio movia-se através das pedras, onde o calor era transferido para esse ar frio e este retornava à estufa, isto com a ajuda de um ventilador de 1,1 kW de potência. Este sistema, conseguia atingir uma diferença de temperaturas entre a estufa com o sistema e a de controlo, de 10 °C durante a noite, e obter uma eficiência de armazenamento solar na ordem dos 34%. Foi referido ainda que comparativamente aos métodos de aquecimento convencionais, a produção era afetada minimamente [33].

2.2.3.2. Sistemas de arrefecimento

O arrefecimento, como foi explicado no ponto 2.2.3., é considerado uma necessidade básica para a agricultura realizada em estufas, nas regiões tropicais e subtropicais, pois permite superar os excessos de temperaturas durante os meses de verão. As estufas (revestidas de plástico e vidro) funcionam como um coletor solar, em dias ensolarados, retendo a radiação solar que conseqüentemente causa o aumento da temperatura interna, se este calor não for removido do interior da estufa, pode resultar em condições indesejáveis para o crescimento e desenvolvimento das plantas. A temperatura do ar interior pode ser diminuída pela redução da radiação solar recebida (sombreamento), pela extração do ar interior através da transferência de ar (ventilação natural ou mecânica) ou por arrefecimento evaporativo [11]. A escolha de um sistema de climatização adequado é uma tarefa difícil, pois o design é diretamente relacionado com as condições ambientais locais, cultura aplicada, manutenção, facilidade de operação,

tamanho da estufa e viabilidade económica [34]. Para o correto desempenho no processo de arrefecimento de uma estufa é necessário também a consideração de aspetos construtivos da estufa, tais como a forma, dimensão, configuração do telhado e material de revestimento.

Um dos métodos eficazes de arrefecimento, abordado anteriormente como um aspeto construtivo a ter em conta para a renovação de ar exigida para a sobrevivência das culturas, é a ventilação natural (passiva). Tem a vantagem de utilizar pouca energia externa e pode ser conseguida através de aberturas laterais ou aberturas no telhado. O ar frio externo entra na estufa através das aberturas laterais inferiores, enquanto, o ar interno quente sai nas aberturas do telhado devido à diferença de densidade entre massas de ar de diferentes temperaturas, resultando na diminuição da temperatura interior [11]. Devido à ventilação natural ser altamente dependente das condições ambientais externas, a sua eficiência é limitada em áreas (ou em períodos) com velocidades de vento baixas ou nulas. Além disso, enquanto a eficiência aumenta em relação à altura da estufa, isso também implica custos adicionais. Então, a ventilação mecânica representa um meio alternativo para aliviar o excesso de carga térmica. A ventilação forçada é baseada na criação de um fluxo de ar através da estufa, ventiladores sugam o ar de um lado, enquanto aberturas do outro lado, deixam entrar ar. A ventilação forçada com ventiladores elétricos é a maneira mais eficaz para efetuar as trocas de ar mas não é de todo a mais energeticamente eficiente, pois a título de exemplo, este processo numa estufa localizada no Mediterrâneo consome cerca de 100 000 kWh por hectare [11].



Figura 2.9 - Ventilação mecânica: interior (esquerda) e exterior (direita) (adaptado de [11]).

Um sistema de aplicação fácil e funcional é o sombreamento, impedindo a entrada de radiação ou luz indesejada, surge como uma opção viável para a produção agrícola durante o pico de temperaturas no verão [35]. O sombreamento pode ser feito através de vários métodos: uso de tintas, persianas externas, uso de redes, telas de sombra parcialmente refletivas ou até o uso de uma película de água sobre o telhado [23]. Um trabalho realizado por Baille et al. estuda a influência do branqueamento de um telhado de uma estufa no seu ambiente interior, em pleno verão, localizada no leste da Grécia. O autor refere a redução do coeficiente médio de

transmissão da estufa para a radiação solar de 0,62 para 0,31. Como consequência, a temperatura do ar e humidade no interior sofreram mudanças consideráveis, concluindo que o processo foi barato e apresentou efeitos positivos no microclima e no comportamento das plantas. Uma desvantagem que o autor considera é a dificuldade em retirar a densidade do sombreamento visto que após o verão é necessário o aquecimento da estufa, processo que o sombreamento dificulta. No entanto, pode ser considerado como um meio eficiente para aliviar a carga térmica interior, durante o verão, em países mais quentes [36].

Nem o sombreamento ou a ventilação (natural ou mecânica), conseguem reduzir a temperatura do ar na estufa a níveis abaixo da temperatura do ar exterior. Se for necessária uma temperatura mais baixa deve ser adotado o sistema de arrefecimento evaporativo [11]. É o método mais eficaz para controlar a temperatura e humidade dentro de uma estufa, no entanto, a sua aplicação é restrita à respetiva região e clima [35]. Estes sistemas baseiam-se na conversão do calor sensível em calor latente através da evaporação da água fornecida diretamente na atmosfera de estufa (névoa). Durante o processo, o calor total do ar permanece o mesmo, sabe-se que um grama de água evaporada em 1 m³ de ar reduz sua temperatura em cerca de 2,5 °C. O método mais utilizado neste tipo de climatização é o sistema de nevoeiro, ilustrado na figura seguinte, que consiste em água a alta pressão, pulverizada em pequenas gotículas no ar acima das plantas, com a finalidade de aumentar a superfície de água em contato com o ar. Estes sistemas permitem não só o arrefecimento mas também o aumento da humidade interna da estufa [23].



Figura 2.10 - Sistema de arrefecimento evaporativo [11].

Toida et al. desenvolveram um estudo com o objetivo de obter uma maior taxa de evaporação da névoa durante a operação da nebulização. Com esse intuito, usaram pequenos ventiladores para forçar um fluxo de ar descendente com nevoeiro, e ao mesmo tempo monitorizaram perfis horizontais da temperatura do ar e da área de cobertura do nevoeiro na relação com o

fornecimento de ar dos ventiladores e a sua direção. Os resultados obtidos mostraram que a evaporação de nevoeiro com os ventiladores foi 1,6 vezes maior que sem ventiladores, concluindo que este sistema cria uma alta razão de evaporação que aumenta a eficiência de refrigeração e ainda mantém a folhagem das plantas relativamente seca [37].

2.2.3.3. Sistemas combinados

Um sistema combinado pode ser usado para aquecer a estufa no inverno e arrefecer no verão. O permutador de calor ar-solo (EAHES), o sistema deste tipo usado com mais sucesso para estufas agrícolas e que é o motivo de estudo do nosso trabalho, foi pensado por Bernier et al. no início da década de 90. Inspirados por promissores resultados em outras aplicações, estudaram a performance de um permutador de calor e os possíveis benefícios da aplicabilidade numa estufa agrícola comercial. A estufa localizada no Canadá, construída em policarbonato e utilizada para produção de tomates, tinha uma área de 80 m² e a sua climatização era efetuada por um permutador de calor constituído por 26 tubos com 10,5 m de comprimento, divididos em duas filas com 13 tubos cada, dispostas horizontalmente, separadas por uma distância de 45 cm e colocados a uma profundidade de 45 e 75 cm. A ventilação no permutador era auxiliada por um ventilador. Com diferenças de temperatura, entre o solo e o interior da estufa, a oscilar, entre 0 °C e 10 °C, os resultados obtidos mostram que o COP médio foi de 4.6. No entanto, os autores referem que o sistema deve ser operado com diferenças de temperatura ar-solo de 2 °C, ou mais, para se obter uma operação eficiente [38].

Um outro sistema combinado é o permutador de calor de cavidades acoplado a um aquífero (ACCFHES), em que utiliza a temperatura constante de um grande reservatório para, através dele, fazer trocas de calor por um tubo de circulação de ar [18]. Na Índia, região do globo onde se empenham particularmente na procura de sistemas alternativos para climatização de estufas, V. Sethi, S. Sharma no ano de 2007, desenvolveram um modelo matemático para o aquecimento/arrefecimento de uma estufa agrícola, integrada com um permutador de calor de cavidades acoplado a este sistema. A estufa, com uma área de 24 m², tinha nos seus lados escavada uma trincheira que armazenava a água bombeada do aquífero. Neste local subterrâneo, a água encontrava-se uma temperatura aproximadamente constante, entre 24-25 °C, durante todo o ano. A circulação de ar, forçada por um ventilador de 746 W entre o interior da estufa e a cavidade, era realizada através de um tubo com 10 cm de diâmetro e 20 m de comprimento, submerso na trincheira que percorria as laterais da estufa. No verão, a temperatura máxima medida no interior da estufa, sem o uso de nenhum sistema de climatização, foi de cerca 50 °C, enquanto a temperatura medida à saída do tubo, depois de feita a circulação, foi de 25 °C e após o ar se misturar com o ambiente da estufa, foi lido o valor de 35 °C no interior da mesma. No inverno, com temperaturas de 4 °C no interior da estufa, a temperatura lida à saída do tubo do permutador foi de 24 °C e o ambiente na estufa depois se misturar o ar foi de 13 °C. Estes valores experimentais medidos, serviram como validação do modelo matemático, registando-se um desvio de apenas 3,92% [39].

2.3. Potencial do solo como fonte térmica

O planeta Terra é constituído por um núcleo com temperaturas de tal forma elevadas que os elementos químicos constituintes das rochas superficiais estão no estado líquido. No entanto, devido à grande massa de solo e de material rochoso que constituem a Terra, as diferenças de temperatura entre o núcleo e a superfície são bastante acentuadas, isto porque, segundo as leis da Física, quanto maior for a massa de um determinado material, maior será a sua resistência a reagir a possíveis diferenciais de temperatura. A superfície terrestre possui grande potencial de isolamento, tal que as variações diárias da temperatura superficial terrestre não penetram muito mais que aproximadamente 0,50 metros de profundidade e as variações sazonais até uma profundidade de aproximadamente 3 metros. Além dessa profundidade, a temperatura da Terra, permanece relativamente constante. O valor dessa temperatura é geralmente visto como equivalente à média do ano todo da temperatura da superfície do solo [40]. Portanto, a uma profundidade suficiente, a temperatura do solo é sempre maior do que a do ar exterior no inverno e é menor no verão.

2.3.1. Regime térmico do solo

O solo é composto por quatro constituintes principais, matéria mineral e orgânica, que juntos formam os agregados sólidos, e os espaços dos poros que são preenchidos com ar ou água. A combinação desses quatro constituintes, juntamente com uma ampla variedade de organismos vivos, torna os solos muito diferentes uns dos outros. Um solo fértil médio é ocupado por cerca de 45 % de matéria mineral, matéria orgânica cerca de 5 % (exceto para solos orgânicos) e os restantes 50 % a serem ocupados por ar e água. A taxa na qual as mudanças de temperatura do solo ocorrem dependem do fluxo de calor para o interior e exterior do solo, por sua vez, o fluxo de calor depende do gradiente de temperatura e da capacidade térmica e condutibilidade do solo [41]. Reconhecer as reservas de calor do solo e a sua dinâmica periódica (diária, sazonal ou anual) não é fácil, pois trata-se de um objeto de pesquisa complexo, requer uma determinação precisa em cada tipo de solo, devido à sua localização e características físicas, bem como um conjunto de parâmetros variáveis em função do tempo e, principalmente, dependendo do tipo de solo, zona climática e condições meteorológicas [42].

A temperatura do solo ao longo da profundidade da superfície terrestre pode ser dividida em duas regiões, a “thermocline zone” (0-10 m), onde a temperatura do solo varia com o tempo e a mudança sazonal é óbvia, e “thermostatic zone” no solo mais profundo (10-100 m), onde a temperatura do solo se mantém praticamente constante ao longo de um ano inteiro. Na primeira zona anunciada, a mais superficial, a energia contida no solo é principalmente da radiação solar, que por sua vez varia com a latitude, tipo de terreno, estações do ano, dia e noite, cobertura da superfície, etc. Na segunda e mais profunda, as mudanças de temperatura vão-se anulando, abaixo de uma certa profundidade a temperatura do solo permanece relativamente constante em todo o ano devido à inércia térmica deste [43].

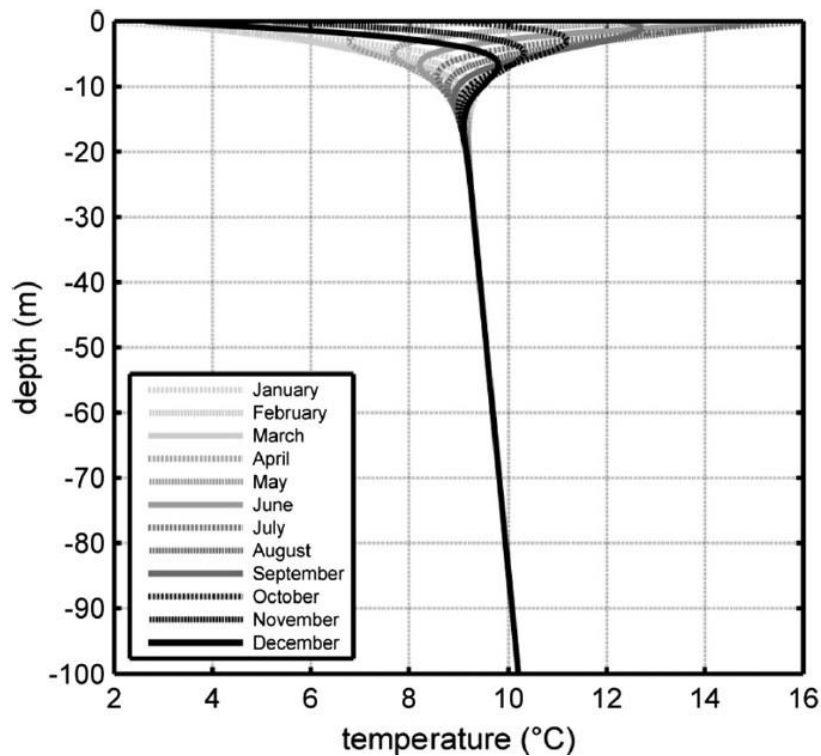


Figura 2.11 - Distribuição de temperaturas do solo com o aumento da profundidade ao longo de um ano [44].

Em 2017, Radioti et al. efetuaram um estudo prático que comprova a teoria existente, medindo a temperatura do solo, durante dois anos, desde a superfície até 100m de profundidade. Os autores dizem, baseados em dados obtidos, que até 18 m de profundidade existe uma chamada zona de instabilidade em que a temperatura do solo é influenciada pelas condições meteorológicas existentes à superfície [44].

As temperaturas podem variar segundo diferentes condições, como o local, clima, tipo de terreno, etc, [43][45], no entanto, com mais ou menos aproveitamento, a superfície terrestre pode ser usada como fonte de calor, seja para aquecer ou arrefecer determinado local, independentemente da localização geográfica.

2.3.2. Propriedades térmicas do solo

Um dos fatores principais que originam os processos de troca de massa e energia que ocorrem no nosso planeta é a propriedade térmica do solo. As condições térmicas têm um impacto significativo no clima local, crescimento e desenvolvimento das plantas. A quantidade de calor trocada no solo é afetada por condições climáticas, topografia, hora do dia, tempo e as características da superfície, como a cobertura vegetal ou tipo de solo onde as trocas de energia ocorrem. A energia recebida e a acumulação de calor varia rapidamente e aleatoriamente devido à natureza do vento e da cobertura de nuvens [46]. Por outro lado, as propriedades

térmicas do solo dependem das propriedades físicas do mesmo [47] [48], e são determinadas pela sua composição mineralógica, distribuição granulométrica, teor de matéria orgânica, densidade do solo, teor de água e temperatura [49]. A concentração de água e a temperatura do solo podem ser medidas por diferentes sistemas (torres de controle, aeronaves ou satélites), à escala espacial pequena e média estes parâmetros podem ser medidos por dispositivos portáteis. A densidade granulométrica do solo é geralmente determinada por método gravimétrico a partir de amostras do solo. Em meios porosos tal como é o solo, é difícil medir remotamente as propriedades térmicas e ainda mais difícil determinar a sua distribuição em grandes áreas, por isso, é importante desenvolver métodos para determinar as propriedades térmicas do solo através de outras propriedades físicas do solo facilmente alcançáveis, como a textura ou a densidade [46]. Embora o desempenho térmico do solo seja influenciado pelas suas propriedades físicas de difícil análise, como foi explicado anteriormente, as suas constituintes tais como a condutibilidade térmica, o calor específico volumétrico e difusividade térmica, podem ser determinadas, indiretamente, medindo a subida ou descida de temperatura em resposta a uma entrada de calor até um certo ponto de interesse [49]. A condutibilidade térmica é uma propriedade típica que caracteriza a maior ou menor facilidade de transferência de calor, ou seja, de condução de calor entre os materiais [50]. Os principais fatores que influenciam a condutibilidade térmica do solo são o grau de saturação de água, densidade de matéria seca, mineralogia do solo, granulometria, entre outros [51]. Já o calor específico volumétrico expressa a quantidade de calor necessária para a temperatura de um metro cúbico de substância ser aumentada em um grau. Quanto à difusividade térmica, esta propriedade expressa a taxa de transferência de calor num certo meio, os solos que têm um valor elevado deste parâmetro indicam que há variações mais rápidas da sua temperatura [51]. Na tabela (2.3) são mostrados alguns valores típicos dos parâmetros enunciados.

Tabela 2.3 - Propriedades de alguns tipos de solo e materiais. Adaptado de [52].

		Condutibilidade [W/mK]]	Calor específico volumétrico [kJ/m ³ K]	Difusidade térmica, *10 ⁻⁷ [m ² /s]	
TIPOS DE SOLO	Argila/Silte	Seca	0,4 - 1	1500 - 1600	2,67- 6,25
		Saturada	1,1 - 3,1	2000 - 2800	5,50 - 1,11
	Areia	Seca	0,3 - 0,9	1300 - 1600	2,31- 5,63
		Húmida	1,0 - 1,9	1600 - 2200	6,25 - 8,64
		Saturada	2,0 - 3,0	2200 - 2800	9,09 - 10,71
	Seixo	Seco	0,4 - 0,9	1300 - 1600	3,08 - 5,63
Saturado		1,6 - 2,5	2200 - 2600	7,27 - 9,62	
MINERAIS	Mica	2,0 - 2,3	2000 - 2300	9,09 - 10,41	
	Quartzo	7,7	1900 - 2000	38,50 - 40,53	
	Calcite	3,6	2240	9,09 - 10,41	
	Feldspato potássicos	2,3 - 2,5	1600 - 1800	13,89 - 14,38	
	Plagióclase	1,5 - 2,3	1640 - 2210	9,15 - 10,41	

Como as propriedades térmicas do solo têm um elevado relacionamento com os seus constituintes, um antigo aluno da UBI efetuou a análise granulométrica por peneiração húmida de cada amostra de solo, dos locais de estudo, para monitorização da temperatura terrestre. As amostras apresentam uma composição de seixo, areia e silte/argila com os valores de constituição muito próximos entre as 4 localizações [53]. É de mencionar ainda que estas análises fazem apenas referência a uma amostra de solo, fornecendo meramente uma aproximação do solo representativo, não podendo retirar-se conclusões detalhadas a partir destes dados.

2.4. Permutadores de calor ar-solo

Como vimos no ponto 2.3., o solo tem um enorme potencial térmico que pode ser explorado na área da climatização. A procura por métodos de climatização alternativos tem-se mostrado um projeto atual a nível global muito por culpa da crise ambiental que se vive em todo o mundo, em que a climatização representa uma grande cota parte do consumo energético mundial aliada à grande poluição que acarreta a produção de energia, proveniente maioritariamente de combustíveis fósseis. Hoje em dia o problema não é apenas manter e melhorar o conforto térmico para as pessoas mas também evitar gastos excessivos em aquecimento e arrefecimento [54]. O permutador de calor ar-solo ou em terminologia inglesa, Earth to Air Heat Exchanger (EAHE), surge então como uma solução para os problemas energéticos, visto como um método

alternativo de aquecimento e arrefecimento, podendo ser utilizado na climatização de edifícios, indústrias, estufas, entre outras aplicações. As vantagens da utilização deste sistema são várias e encorajadoras, e apresentadas de seguida:

- Consumo baixo de energia comparado com sistemas convencionais;
- Problemas de poluição ambiente minimizados;
- Não usam compressor ou qualquer refrigerante;
- Ar usado como fluido de trabalho;
- Têm um design simplista;
- Baixa manutenção;
- A unidade não está exposta a fenómenos meteorológicos extremos.

No entanto, apresenta certos inconvenientes:

- Custo inicial elevado, no entanto, uma vez instalado, o custo anual é menor ao longo da vida útil do sistema;
- Convecção do ruído do ventilador através dos tubos para espaços externos;
- Condensação criada nas tubagens;
- Durante o período de operação a qualidade do fluido de trabalho (ar) diminui e aumenta a possibilidade da proliferação de micro-organismos;
- filtros adequados devem ser usados se a qualidade do ar for uma prioridade [55].

2.4.1. Princípio de funcionamento

O permutador de calor ar-solo é um sistema de climatização passivo capaz de aproveitar a capacidade térmica terrestre que possui grande vantagem sobre outros sistemas de climatização, pois dispõe da capacidade de efetuar ambos os efeitos: aquecimento nos meses mais frios e arrefecimento nos meses mais quentes. Este sistema é constituído por um ou vários tubos enterrados no solo, que ao serem percorridos pelo ar, a temperatura superior ou inferior à do solo, efetuam as trocas de calor. O calor é transferido do solo para o tubo essencialmente por condução, já a transferência do tubo para o ar é feita sobretudo por convecção [56]. Movimentando-se o ar num só sentido, o sistema conta apenas com uma entrada e saída de ar, começando por ser aspirado o ar na entrada e após percorrer todo o comprimento do permutador de calor é devolvido pela saída no local que se deseja climatizar. O ar que circula nos tubos deste sistema é normalmente auxiliado por meio de um sistema de ventilação que obriga o ar a circular nos tubos enterrados, pois comparativamente ao processo de ventilação natural garante um caudal superior e constante. Para melhor associação de ideias, é mostrado de seguida, o princípio de funcionamento do sistema.

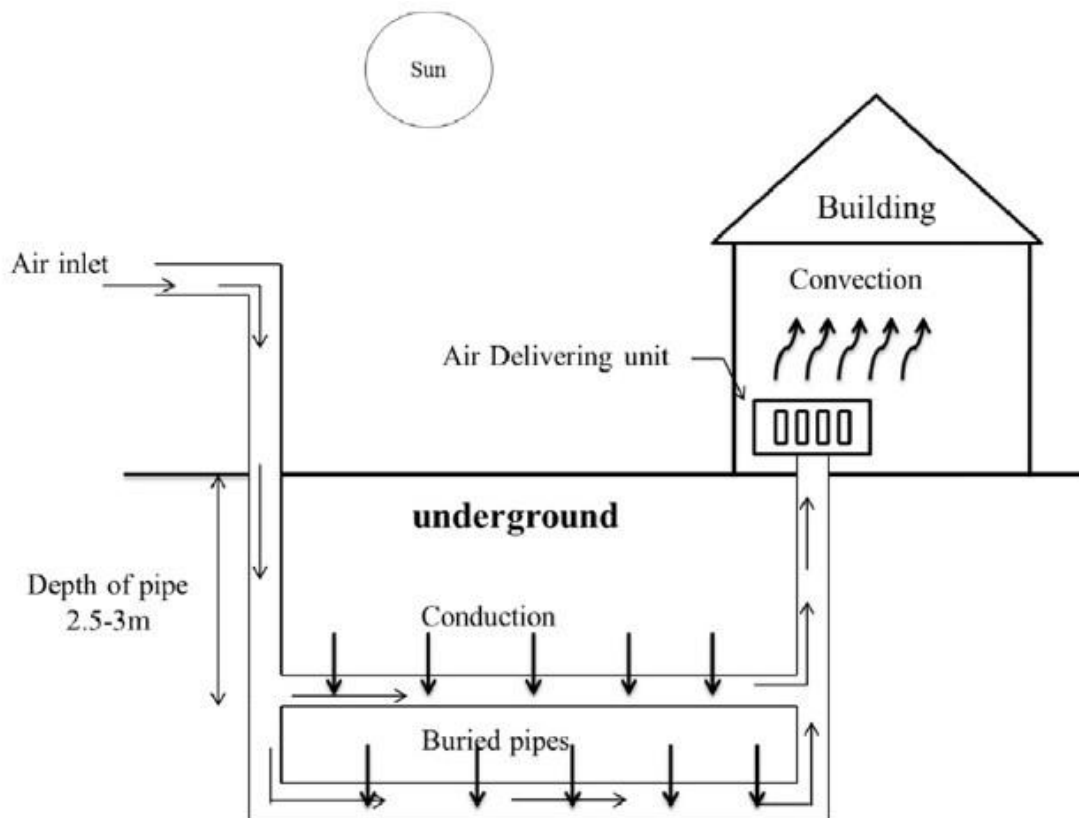


Figura 2.12 - Esquema do princípio de funcionamento [57].

2.4.2. Tipos de permutadores ar-solo

Os permutadores de calor ar solo surgem um pouco por todo o mundo com diversas configurações e podem ser classificados não só quanto ao tipo de sistema, mas também com base no layout do tubo enterrado e o seu modo de arranjo. Segundo o layout do tubo pode ser classificado por loop horizontal/reto, loop vertical, loop em espiral ou loop helicoidal, já segundo o modo de arranjo ou a sua disposição, pode ser um sistema de um tubo ou um sistema de tubos paralelos [57]. No entanto, o mais usual é a classificação quanto ao tipo de sistema, onde existem dois principais tipos, os sistemas abertos e os fechados [58].

No sistema aberto ilustrado na próxima figura, o ar exterior circula através dos tubos enterrados no solo até chegar ao ventilador onde é introduzido diretamente no interior do edifício, apresentando a vantagem de permitir uma renovação constante do ar no espaço que se deseja climatizar. Esta possibilidade de sistema é bastante utilizada nos chamados sistemas híbridos (sistemas que conjugam este sistema com uma ou várias unidades externas de climatização de ar), onde o permutador de calor ar-solo é utilizado para pré-aquecimento/arrefecimento do ar [55].

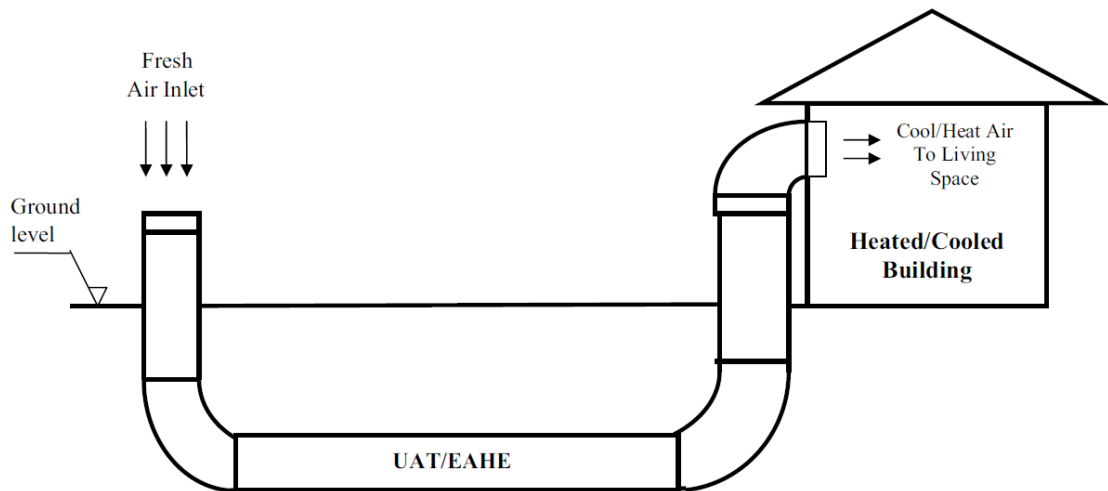


Figura 2.13 - Esquema ilustrativo do sistema aberto [55].

Em 2006 um sistema aberto e híbrido, estudado por Soni et al., constituído por um ar condicionado e auxiliado por um permutador de calor ar-solo, foi testado para arrefecimento de uma divisão com 18.75 m³ de volume, localizada na região central da Índia onde as temperaturas podem atingir 46 °C. O ar condicionado tinha uma potência de 5 kW e o permutador de calor ar-solo construído em aço galvanizado, era constituído por um tubo enterrado a 3 m de profundidade, com 5 cm de diâmetro e comprimento total de 9 m. O ar que circulava entre o permutador e ar condicionado era auxiliado por um ventilador com 0.37 kW de potência. As conclusões que o autor retirou do estudo revelam que a energia consumida pelo ar condicionado podia baixar até 11% e que o sistema se pagava a si próprio após aproximadamente 3 anos de funcionamento [59].

Nos sistemas fechados (Figura 2.14), considerados mais eficientes que os sistemas abertos [57], o ar interior é forçado a circular num circuito fechado de tubos enterrados (com várias configurações possíveis) e encaminhado de volta para o interior do edifício. Esta configuração é geralmente a mais económica quando existe o espaço adequado disponível e os desaterros são fáceis de efetuar [60]. Por outro lado, este tipo de configuração tem ficado esquecida por não cumprir os requisitos impostos pela legislação relativa à qualidade do ar interior, em edifícios de serviços ou habitacionais que impõe valores mínimos relativamente às renovações de ar, num certo período de tempo [61].

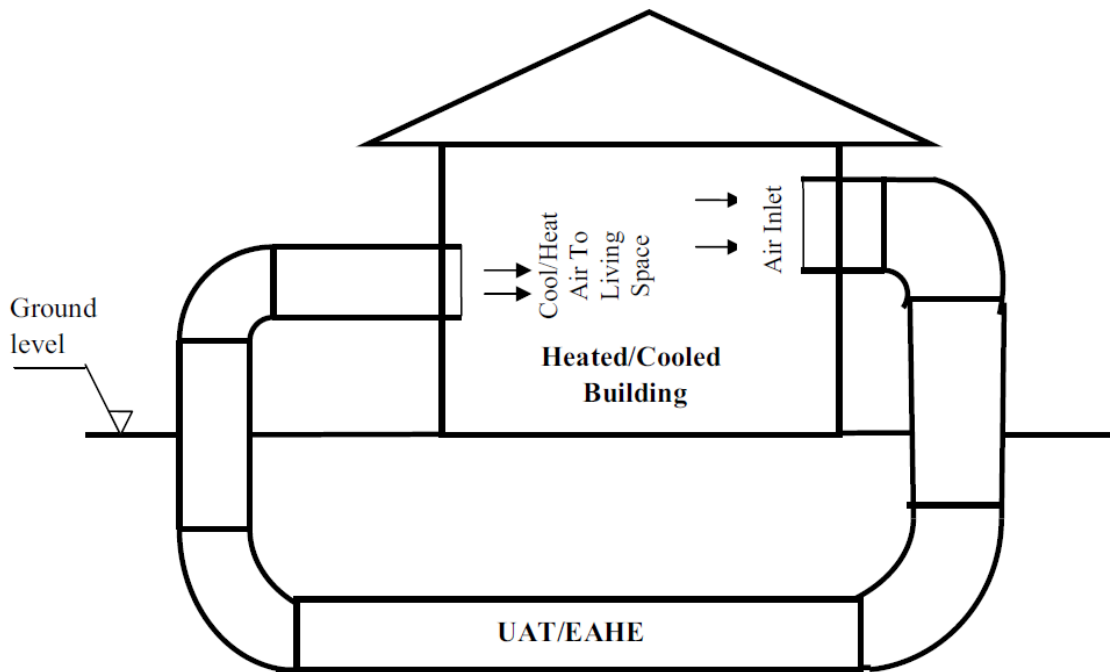


Figura 2.14 - Esquema ilustrativo do sistema fechado [55].

Este sistema possui diversas configurações e pode ser agrupado consoante a disposição no solo, horizontalmente (Figura 2.15) ou verticalmente (Figura 2.16). A escolha sobre o tipo de configuração depende não só do espaço disponível mas também do custo relacionado com as perfurações e escavações. A configuração horizontal, geralmente situada a 2-3 m de profundidade está mais sujeita à influência da radiação solar no solo e às alterações de temperatura sazonais. Recentemente, Mongkon et al. estudaram a aplicação de um permutador de calor subterrâneo (disposto horizontalmente), no arrefecimento de uma estufa agrícola localizada em Chiang Mai, no norte da Tailândia, onde se verifica um clima tropical. O permutador enterrado a 1 m de profundidade tinha um comprimento de 38.5 m, enquanto a estufa um volume de 30 m³. O estudo focou-se principalmente no desempenho de arrefecimento do permutador de calor, através da análise das diferenças de temperatura no permutador, calor removido da estufa e coeficiente de desempenho. Obtiveram coeficientes de desempenho médios de 1,41 no inverno, 2,32 no verão e de 0,54 na época de monções. No final do estudo os autores constataram que o seu permutador de calor se adequava às necessidades da estufa construída e que estes tipos de projetos têm bastante potencial no arrefecimento em climas tropicais.

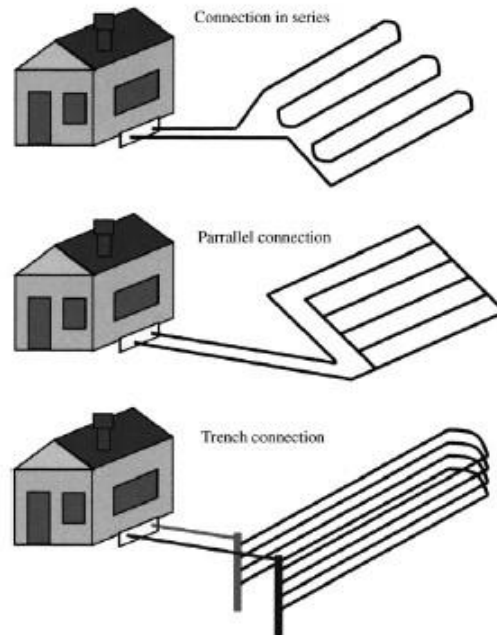


Figura 2.15 - Configurações horizontais em sistemas de circuito fechado [60].

Já a escavação é o principal entrave relevante na viabilidade de implementação do sistema vertical [62]. Permutadores verticais são largamente utilizados quando há necessidade de instalar uma capacidade de troca de calor suficiente numa área de superfície pequena, e também quando a terra é rochosa perto da superfície ou onde a mínima degradação da paisagem é desejada [60]. Este sistema tem a principal vantagem de permitir uma larga área de contato com o solo, originando uma melhor dissipação da carga térmica, por outro lado o custo que a implementação deste sistema acarreta leva a que a escolha recaia sobre o disposto horizontalmente [58]. Um exemplo de um permutador de calor ar-solo com configuração vertical foi desenvolvido por Yuping et al. em 2008 aplicado num armário de telecomunicações com o intuito de procurar fiabilidade, baixo custo e aplicação prática no arrefecimento do seu interior através do subsolo. O permutador era composto por seis tubos, em liga de alumínio e amónia, distribuídos em formato de alheta. Dois ventiladores garantem a circulação do ar entre o permutador de calor e o armário, dirigindo o ar quente produzido pelos aparelhos eletrónicos para o permutador de calor, onde era efetuada a permuta entre o solo e o ar quente. Dados analisados experimentalmente e com auxílio de software computadorizado, concluem que o equipamento conseguiu reduzir a temperatura no interior do armário, com 700 W de carga térmica, em 5 °C, para uma temperatura exterior na ordem dos 30 °C [63].

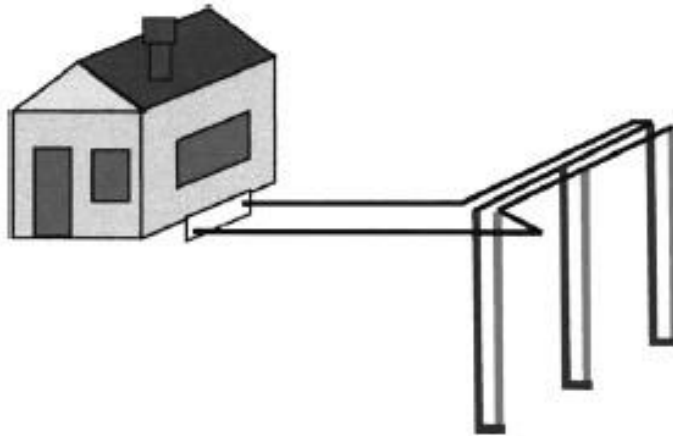


Figura 2.16 - Configuração vertical em sistemas de circuito fechado [60].

2.4.3. Parâmetros e fatores influentes

O desempenho energético de um sistema EAHE é influenciado por muitos fatores, sendo os principais a ter em conta: o comprimento do tubo e seu material, o ventilador de circulação de ar, as características do solo, a sua humidade e as diferenças de temperatura entre o solo e o ar ambiente. O conhecimento das propriedades térmicas do solo é muito importante no projeto e aplicação desta técnica de climatização, por isso um dos primeiros passos a ter em consideração num sistema EAHE é a avaliação geológica do local de aplicação, bem como, informação relativa aos aquíferos disponíveis no local, a sua capacidade de produzir água, profundidade da água, profundidade para o leito de rocha e a natureza do solo e da rocha (propriedades hidráulicas e térmicas) [55]. Os solos com níveis de humidade mais elevados apresentam maior condutibilidade térmica, produzindo melhores efeitos na transferência de calor por condução, por isso é assim importante escolher um solo que tenha boa condutibilidade térmica para melhores desempenhos térmicos, como vimos na secção 2.3.2.

Quanto à profundidade da instalação, como vimos na secção 2.3.1., a temperatura do solo varia no tempo mas essa variação é diminuída quando se aumenta a profundidade de instalação, a uma profundidade suficiente a sua temperatura mantém-se constante ao longo do ano [64]. O aumento da profundidade, aumenta consideravelmente o potencial de climatização, sendo a profundidade ótima entre os 2-4 m [64] [65] [66] .

Um aspeto também importante é o comprimento e diâmetro do(s) tubo(s) do permutador de calor. Para que o sistema seja eficiente para o aquecimento e arrefecimento, as tubagens devem ter comprimentos na ordem dos 20-70 m [66]. Normalmente quanto maior for o comprimento do tubo e o seu diâmetro menor, melhor é a transferência de calor pelo solo. No entanto, isso aumenta a pressão, o que origina um maior consumo do ventilador que promove

a circulação de ar. Para otimização do sistema, deve ser aumentado o número de tubos e obter a melhor combinação entre o comprimento e o diâmetro do tubo [64]. Um estudo feito através de modelos matemáticos em 1997, realizado por Bojic et al., permitiu avaliar a performance técnica e económica de um permutador de calor ar-solo no aquecimento e arrefecimento de um edifício com 500 m³ usando ar puro. O permutador de calor construído em tubo PVC era constituído por tubos paralelos a 2,4 m de profundidade cada um com 15 cm de diâmetro, variando o número de tubos e o seu comprimento. Com o estudo concluíram que com o aumento do número de tubos e o seu comprimento, a temperatura que circula nos tubos aproxima-se da temperatura do solo em seu redor [67].

O espaçamento entre tubos do permutador de calor tem também influência no dimensionamento do mesmo. As trocas de calor entre o solo e permutador são efetuadas através dos tubos, se estes não tiverem espaçamento suficiente para que ocorra uma boa dissipação de carga térmica pelo solo, a eficiência do permutador vai ser afetada. Geralmente, quanto maior o espaçamento entre tubos, maior é a potência térmica da instalação [57]. É recomendada uma distância mínima entre tubos de duas vezes o diâmetro externo dos mesmos [64].

Quanto ao material da tubagem do permutador de calor, a sua escolha é baseada em diversos fatores, a sua condutibilidade térmica, resistência à corrosão e o custo. O material do tubo deve ter alta condutibilidade térmica, usando-se preferencialmente o aço, PVC ou betão, dependendo do tipo de solo [57]. Na literatura o material mais usado é o PVC, não só por ser barato e de fácil acesso, mas também por reunir capacidades térmicas aceitáveis. Serageldin et al. dizem mesmo num estudo efetuado que o uso do aço ou cobre, em vez do PVC, traduz-se numa insignificante melhoria, comparando os seus preços [68].

A velocidade de escoamento do ar que circula no interior do tubo, influencia diretamente a duração das trocas de calor ocorridas e conseqüentemente a temperatura à saída do permutador. Quanto maior a velocidade de escoamento, menor será o tempo em que o ar se encontra em contato com as tubagens, originando menores trocas de calor. Assim, para melhores resultados, é importante estabelecer uma relação adequada entre a velocidade do ar circulante e as renovações de ar para o espaço que se deseja climatizar. Normalmente, a velocidade é baixa para garantir que a capacidade de efetuar a permuta de calor seja maximizada [65].

Por último, a duração de funcionamento do permutador também deve ser estudada, um longo período de tempo pode originar uma saturação térmica do solo adjacente ao permutador. Este parâmetro está interligado com o parâmetro anterior, pois quanto menor for a velocidade, maior será a capacidade de recuperação térmica do solo. A temperatura de entrada no permutador também define diretamente o tempo de funcionamento sem que as temperaturas do solo se alterem significativamente [69].

O dimensionamento de um permutador de calor deve ser efetuado tendo em consideração os parâmetros referidos anteriormente pois todos eles influenciam diretamente o desempenho do sistema. Os parâmetros devem ser definidos da melhor forma possível de modo a obter uma boa relação entre custo e eficiência. Segundo kabashnikov et al., a instalação deste sistema com os parâmetros de dimensionamento apropriados, pode ser a alternativa perfeita aos sistemas convencionais [70].

2.4.4. Análise energética

O permutador de calor é apresentado como um sistema de climatização de baixo consumo de energia e capaz de reduzir/aumentar a temperatura do ar que por ele passa, recorrendo apenas à utilização de um ventilador. Para efetuar uma análise energética deste sistema, são empregues equações que permitem calcular a potência de aquecimento/arrefecimento do permutador de calor e o coeficiente de desempenho (*COP - Coefficient of Performance*).

As potências calculadas estão relacionadas com o aumento ou redução da temperatura, do fluido que circula no permutador, entre a entrada e saída do mesmo. Se considerarmos que a interface entre o solo e o tubo do permutador é perfeita e a condutividade do solo é muito elevada comparativamente à do tubo, então, a temperatura da parede interna do tubo pode ser considerada constante [64]. Assim sendo, a potência de aquecimento/arrefecimento é calculada, em kW, pelas equação (2.4) [64] [71] [72]:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar} c_{p,ar} (T_{saída} - T_{entrada}) \quad (2.4)$$

e

com,

- \dot{m}_{ar} - Caudal mássico do ar, [kg/s];
- $c_{p,ar}$ - Calor específico do ar a pressão constante, [kJ/kg/K];
- $T_{entrada}$ e $T_{saída}$ - Temperatura do ar à entrada e saída do permutador.

O valor do calor específico do ar deve ser apurado a partir da temperatura média do ar (T_m), entre a entrada e a saída.

O cálculo do caudal mássico pode ser efetuado a partir da seguinte expressão:

$$\dot{m}_{ar} = \rho_{ar} \frac{\pi d^2}{4} v_{ar} \quad (2.5)$$

Com:

- ρ_{ar} - Massa específica do ar (considerando o valor médio (T_m), [kg/m³];
- d - Diâmetro interno do tubo, [m];
- v_{ar} - Velocidade média de escoamento do ar, [m/s].

O coeficiente de desempenho (COP) aplicado ao permutador, representa a razão entre a potência térmica do permutador e a potência elétrica dispensada para gerar a circulação do ar pelo permutador. Este índice indica qual a eficiência do sistema, seja no estado de aquecimento ou arrefecimento, calculando-se pela seguinte expressão [72] [73]:

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} \quad (2.6)$$

Com:

- COP - Coeficiente de desempenho em aquecimento e arrefecimento;
- \dot{W} - Potência elétrica dispensada pelo sistema de ventilação, [W].

2.4.5. Aplicações

O sistema de climatização através de um permutador de calor ar-solo possui inúmeras aplicações, edifícios residenciais, edifícios de serviços, armários de telecomunicações (demonstrado na secção 2.4.2.), estufas, basicamente pode-se utilizar onde se queira reduzir ou aumentar a temperatura do ar, seja qual for o fim. Este sistema ainda não está muito disseminado, no entanto, já existem alguns casos em que é aplicado e bem-sucedido. De seguida serão apresentadas várias aplicações e a sua descrição técnica. Algumas imagens serão também inseridas para se obter uma percepção visual do projeto em questão.

2.4.5.1. Estufas agrícolas

Por ser o cerne do presente trabalho, começo por apresentar aplicações em estufas agrícolas, neste caso das primeiras, em 1994, Santamouris et al. utilizou um permutador de calor aplicado a uma estufa agrícola para prevenir o sobreaquecimento durante o verão e gerir melhor as fontes de energia durante o inverno. Além disso, uma parede de armazenamento de calor com 30 cm de espessura feita em blocos de cimento foi utilizada como forma de aquecimento, retendo o calor. Esta estufa com 1.000 m² de área, revestida por placas de fibra de vidro era usada para plantação de rosas no sul da Grécia, onde se registavam temperaturas médias de 34 °C e 3 °C, no verão e inverno, respetivamente. O permutador de calor era constituído por 5

tubos em PVC, cada um com 30 m de comprimento e 22 cm de diâmetro enterrados a 1,5 m. A circulação do ar neste permutador era realizada através de dois ventiladores, um à entrada e outro à saída do permutador. As temperaturas medidas revelam que com recurso aos métodos utilizados conseguiram reduzir a temperatura da estufa em 10 °C no verão, e aumentar entre 2-3 °C durante as noites de inverno [74].

Cerca de uma década mais tarde, no continente asiático, na região indiana de Gujarat, caracterizada por um clima com precipitação escassa e irregular, altas temperaturas, ventos fortes, bem como solos contaminados com sal marinho e com fraca qualidade de água armazenada nos aquíferos, foram efetuados vários estudos com o objetivo de identificar soluções de climatização de estufas que permitissem o aumento da competitividade do setor agrícola local. Assim sendo, em 2004, Sharan et al., desenvolveram uma estufa com um volume de 360 m³, construída com uma estrutura em aço galvanizado revestida por mantas em polietileno com elevada resistência à radiação ultravioleta.

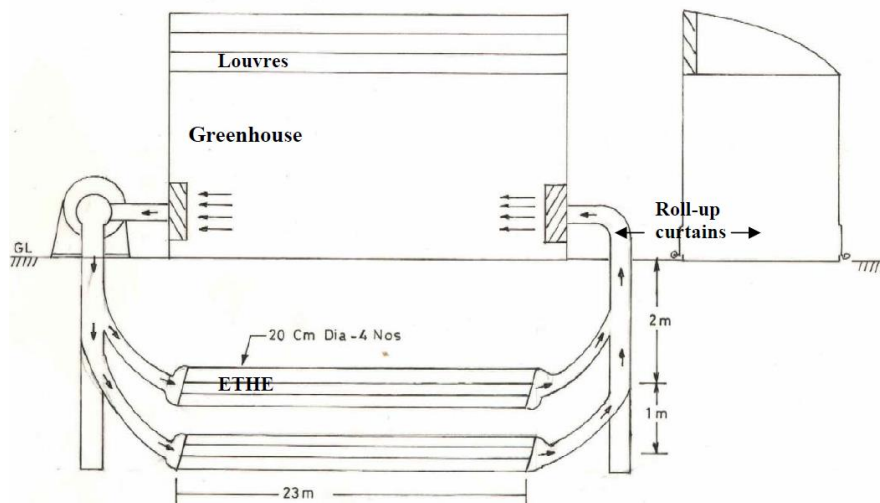


Figura 2.17 - Esboço do sistema elaborado por Sharan et al. [75].

O permutador era constituído por duas filas de quatro tubos cada, enterradas a profundidades distintas: a mais funda enterrada a 3 metros e a outra 1 metro acima. Os tubos em aço macio com um comprimento de 23 metros, diâmetro interno de 20 cm e 3 mm de espessura, estavam dispostos com um espaçamento lateral de 1.5 m. Além disso, existia uma tubagem comum localizada em ambos os extremos dos tubos para uma ligação entre o interior da estufa e os tubos enterrados. Os resultados obtidos mostraram que, em noites típicas de inverno, a temperatura no interior da estufa aumentou de 15 °C para 22 °C em 30 minutos. Em modo de arrefecimento permitiu diminuir a temperatura do ar em cerca de 7 °C. Relataram ainda que houve uma diminuição do consumo de água para irrigação em 34% e um aumento de 2,7 vezes no rendimento da produção de tomate comparativamente à produção em estufa sem o permutador de calor [75].

Mais recentemente (2010) na Turquia, um trabalho experimental levado a cabo por O. Ozgener, L. Ozgener, baseava-se num permutador de calor para aquecimento de uma estufa com 48 m². O permutador era composto por um tubo de aço galvanizado com 47 m de comprimento e 56 cm de diâmetro enterrado a uma profundidade de 3 m, sendo a ventilação pelo permutador assegurada por um ventilador com uma potência de 736 W. Foram feitas avaliações térmicas do solo que corresponderam a uma condutividade térmica estimada de 2.85 W/mK. Para o estudo, com o objetivo de obter a avaliação exergética e económica do permutador de calor e determinação do design ótimo para aquecimento de uma estufa naquele local, foram impostas várias condições para o sistema e para um ambiente de referência. Após a interpretação dos dados do estudo experimental, os autores concluíram que a diferença de temperatura média entre a entrada e saída do permutador foi de 6,09 °C e a potência média de aquecimento no período experimental foi de 7.67 kW, já o COP médio foi de 10,51 [72].

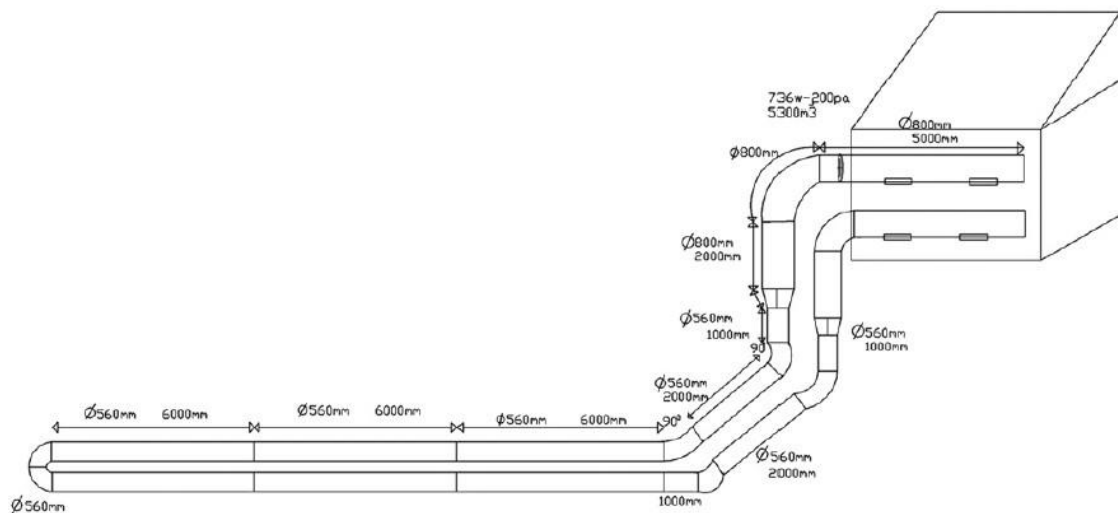


Figura 2.18 - Esquemática do teste experimental elaborado por O. Ozgener, L. Ozgener [72].

2.4.5.2. Edifícios residenciais e de serviços

Um estudo experimental concebido em 1994 por A. Trombe, L. Serres na cidade de Toulouse, no sul da França, consistia num permutador de calor em tubo PVC, enterrado a 2 m de profundidade, 15 cm de diâmetro e 39 m de comprimento, acoplado a um edifício com 39 m². Os autores estudaram a influência que diferentes velocidades de escoamento do ar, no permutador, podem ter na temperatura do ambiente que se deseja climatizar. O estudo concluiu que, no verão, o sistema tem a capacidade de manter a temperatura no interior do edifício na ordem dos 27 °C e, no inverno, usado como pré-aquecedor de um outro sistema de climatização pode reduzir o consumo de energia em 10%. Os autores referem também que um aspeto importante a ter em conta é o isolamento do edifício [76].

Um trabalho experimental executado em 2016 em Marrocos, por Khabbaz et al. consistia no estudo de um permutador de calor ar-solo conectado a um edifício residencial com dois andares, localizado em Marraquexe (Marrocos), um clima semiárido. O permutador de calor consistia em três tubos de PVC enterrados a 3,5 m de profundidade, cada um com 15 cm de diâmetro e 72 m de comprimento, dispostos paralelamente. Um ventilador equipava cada um dos tubos para forçar a circulação de ar. Em períodos de verão, em que a temperatura exterior consegue ser maior que 40 °C, a temperatura do ar ventilada para o interior da habitação consegue manter-se constante na ordem dos 25 °C. Em período de inverno, as temperaturas exteriores oscilavam entre 0 °C e 12 °C enquanto à saída do permutador entre 15 °C e 25 °C. O autor anunciava assim que o sistema era eficiente e adequado, para quem deseja manter uma temperatura de conforto para uma habitação situada num clima quente, bem como para aquecimento nos dias mais frios [66].

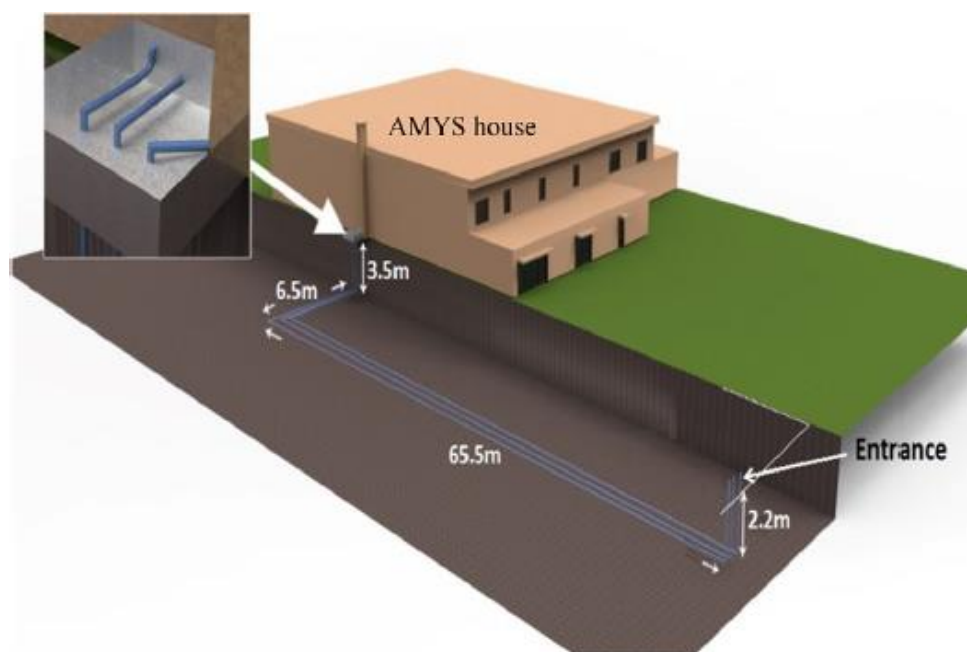


Figura 2.19 - Projeto de climatização em edifício elaborado por Khabbaz et al. [66].

Em Portugal também é utilizado este sistema de climatização, exemplo disso é o chamado “Coolhouse Project”, localizado na urbanização AlmaVerde que foi terminada em 2002 na zona oeste algarvia em Vila do Bispo, perto de Lagos. Os edifícios foram concebidos visando obter condições de conforto térmico em todas as estações do ano, conjugando uma construção maciça e isolada com um sistema de aquecimento e arrefecimento passivo através de tubos enterrados no solo, no exterior de cada moradia, a uma profundidade de 2 metros e com cerca de 70 metros de tubagem em PVC de 16 centímetros de diâmetro. O ar é distribuído no interior do edifício através de uma caixa-de-ar isolada sob o pavimento e inserido no ambiente interior através de ranhuras ao nível dos rodapés, esse pormenor pode ser observado na figura (2.20) [77].

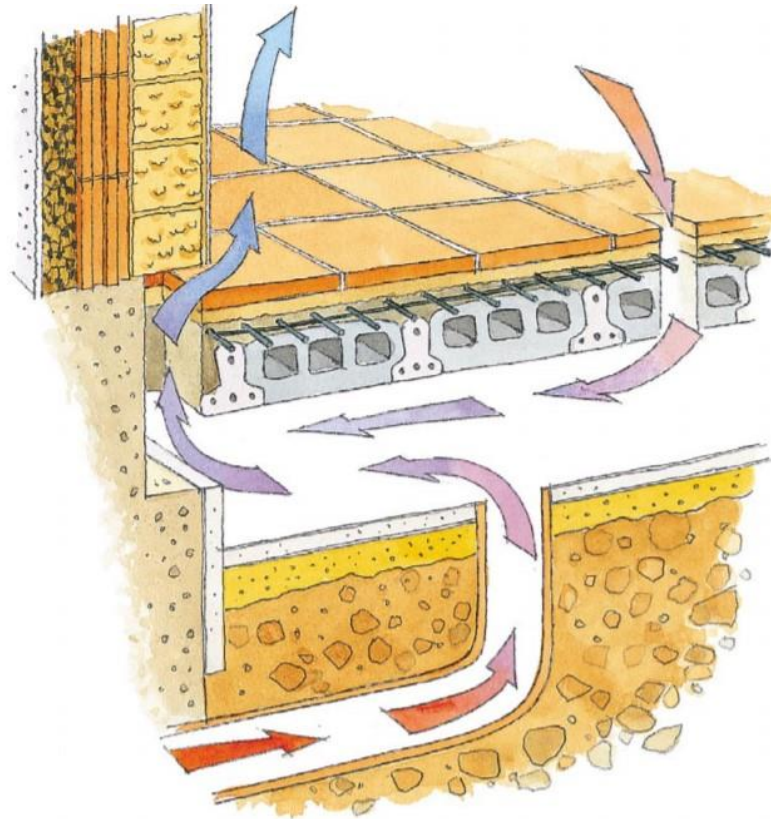


Figura 2.20 - Pormenor da distribuição do ar “Coolhouse Project” [77].

Já em Lisboa, no Lumiar, o edifício Solar XXI construído no campus do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI), utiliza um sistema de permutador de calor ar-solo constituído por um conjunto de 32 tubos de manilhas de cimento, com um diâmetro de 30 centímetros, enterrados a uma profundidade de 4,60 metros. Este sistema aproveita as capacidades geotérmicas do solo que, durante o período de verão atinge temperaturas médias entre os 16 e os 18°C e permite efetuar o pré-arrefecimento do ar exterior, com temperaturas que podem chegar aos 35°C, antes de ser encaminhado para o interior do edifício [78].

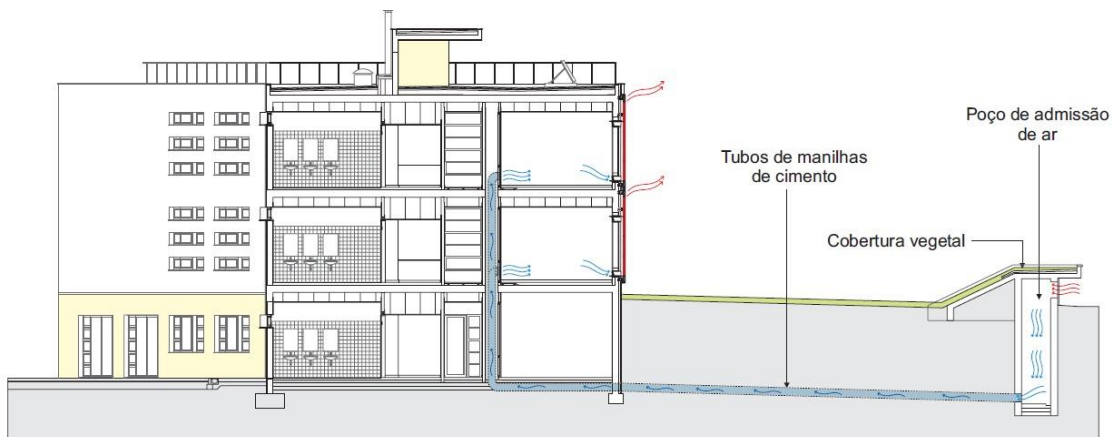


Figura 2.21 - Sistema de arrefecimento do edifício Solar XXI [78].

2.4.5.3. Outros

Um caso curioso de aplicação foi em Ahmedabad (Índia), em que um permutador de calor ar-solo foi implementado por Sharan et al. numa jaula de um tigre, de modo a atenuar as grandes amplitudes térmicas sentidas nesse local durante todo o ano e garantir as condições necessárias para acomodar o animal. O permutador de calor com um comprimento total de 60 m de comprimento enterrado a 1 m de profundidade era composto por 2 tubos de aço paralelamente distanciados a 1,5 m, cada um com 20 cm de diâmetro e 30 m de comprimento. Numa região do globo em que os dias de verão eram caracterizados por uma temperatura média de 40 °C e as noites de inverno abaixo dos 10 °C, o autor revelava ser possível manter a temperatura ambiente no inverno acima dos 10 °C e no verão arrefecer o ambiente em cerca de 8-10 °C, durante o dia [79] [80].

2.5. Nota conclusiva

Em suma, este capítulo ofereceu a base teórica em que a presente dissertação se enquadra e também o conhecimento recolhido pela análise de trabalhos de diversos autores. As estufas agrícolas foram apresentadas destacando os aspetos mais importantes das suas tipologias e aspetos a considerar no seu dimensionamento. Foi destacado também os vários sistemas de climatização utilizados.

Realçou-se a capacidade que a superfície terrestre tem para manter a temperatura aproximadamente constante durante todo o ano, permitindo-se assim a utilização dessa fonte renovável de energia para climatização de espaços com o permutador de calor ar-solo. Foram apresentados vários tipos de aplicações e também uma análise energética ao sistema.

Capítulo 3

3. Instalação experimental e metodologia

3.1. Introdução

Para analisar o desempenho da climatização de uma estufa agrícola através de um permutador de calor ar-solo recorreu-se a um estudo experimental em duas estufas, com as mesmas especificações, uma de teste acoplada ao permutador já existente e a outra de controlo. O intuito é expor as duas estufas exatamente às mesmas condições ambientes e verificar, comparativamente, as temperaturas ambientes internas de cada uma. Todo o processo de construção das estufas e respetivas ligações com o permutador requereram uma análise e discussão de parâmetros que influenciassem o desempenho, materiais e a relação custo-benefício das escolhas tomadas. Será também abordada toda a instrumentação e equipamentos auxiliares necessários para o trabalho experimental de modo a perceber-se o seu funcionamento e finalidade, ainda que de forma resumida.

3.2. Permutador de calor ar-solo

O permutador de calor ar solo utilizado para o estudo experimental é apresentado seguidamente, descrevendo as suas principais especificações técnicas e construtivas. Esta instalação foi projetada e realizada em 2016 pelo professor doutor Luís Pires em conjunto com Anthony Calado, um antigo aluno da Universidade da Beira Interior (UBI).

3.2.1. Localização geográfica

A localização geográfica do permutador de calor como vimos na secção dedicada ao tema, é influenciada por diversos fatores como, a qualidade condutiva do solo, facilidade de escavação e até a proximidade com fontes térmicas capazes de destabilizar a periferia do permutador. Neste caso, a escolha do local de implementação foi pressionada não só pela proximidade de um ponto de eletricidade, mas também pelo espaço disponibilizado pela UBI, situando-se na Faculdade de Engenharia junto ao edifício do CFIUTE (Centro de Formação Interação UBI Tecido Empresarial) com as coordenadas GPS 40° 16' 43" N 7° 30' 48" W.



Figura 3.1 - Localização do permutador de calor ar-solo

3.2.2. Descrição e especificações

O desempenho de um permutador de calor exige um apropriado dimensionamento para se obter o máximo desempenho possível, no entanto, a relação custo-benefício está sempre presente, ainda mais quando se trata de projetos académicos. Foi por isso escolhido o PVC como material do permutador, além de ser barato e apresentar uma condutibilidade térmica aceitável, é de montagem simples, resistente e tem uma durabilidade alta. Este permutador de formato helicoidal está enterrado a uma profundidade de 3 metros, devido essencialmente ao custo de escavação [53], contudo, encontra-se presente já numa faixa de temperatura do solo relativamente constante. Os tubos e acessórios usados, com diâmetro externo de 75 mm e 1,5 mm de espessura, perfazem um total de 29 m de comprimento, contribuindo para uma melhor dissipação da carga térmica. Os cinco patamares do permutador encontram-se distanciados 15 cm entre si, seguindo as recomendações encontradas na literatura ao garantir uma distância entre tubos adjacentes de duas vezes o diâmetro externo do tubo, dando importância também ao volume ocupado pela instalação. Um esquema do permutador de calor ar-solo é apresentado na figura seguinte.

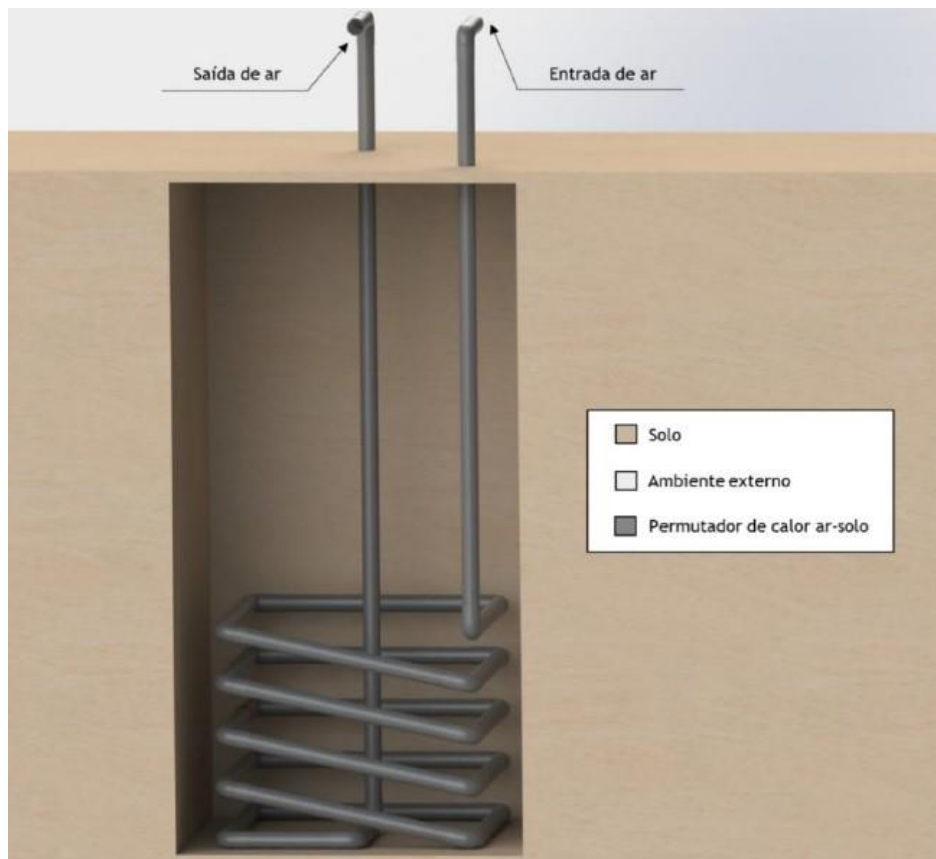


Figura 3.2 - Esquema do permutador de calor ar-solo. Adaptado de [53].

3.3. Estufas

As estufas utilizadas na realização dos ensaios foram dimensionadas e construídas no âmbito deste trabalho. Ao invés de comprar, esta opção foi escolhida pelo facto de reduzir os custos e imposições de tamanho devido à localização do permutador. A localização das estufas situa-se na mesma área do permutador, sendo que a primeira dista cerca de 1 m da saída do permutador e a segunda dista cerca de 3 m da primeira, nestas medidas foi tido em conta a distância necessária para uma não fazer sombreamento à outra. De seguida vão ser apresentadas as estufas e os aspetos e procedimentos construtivos. Devido ao facto de as duas estufas serem exatamente iguais, as especificações e processos vão ser descritos no singular.

3.3.1. Descrição e especificações

O desempenho das estufas é afetado por diversos fatores, no entanto, os constrangimentos sentidos na execução prática podem relegar alguns para segundo plano. O material utilizado na estufa foi a madeira, além de ser barato é relativamente resistente, encontra-se facilmente vários perfis e medidas e apresenta um fácil manuseamento e montagem.

A estufa é do tipo telhado oferecendo assim uma maior resistência à queda de nevões e facilidade de construção, pois seria difícil fazer curvaturas com o material disponível. Para dimensionar as medidas da estufa começou por se encontrar um volume aceitável para que se registasse o efeito da climatização através do permutador de calor, seguido do constrangimento do espaço disponível no local de implementação. Um outro parâmetro que foi tido em conta foi a altura da estufa, pois de acordo com a literatura a altura da estufa protege as culturas do calor ao retê-lo nos pontos mais altos, assim sendo optou-se por aumentar um pouco mais a altura. A disposição da estrutura da estufa foi montada de forma a poupar o máximo material possível e apresentar rigidez estrutural suficiente para suportar as rajadas de vento máximas no local de implantação, com uma área máxima exposta de cerca 3,8 m². As dimensões da estufa são mostradas na figura seguinte.

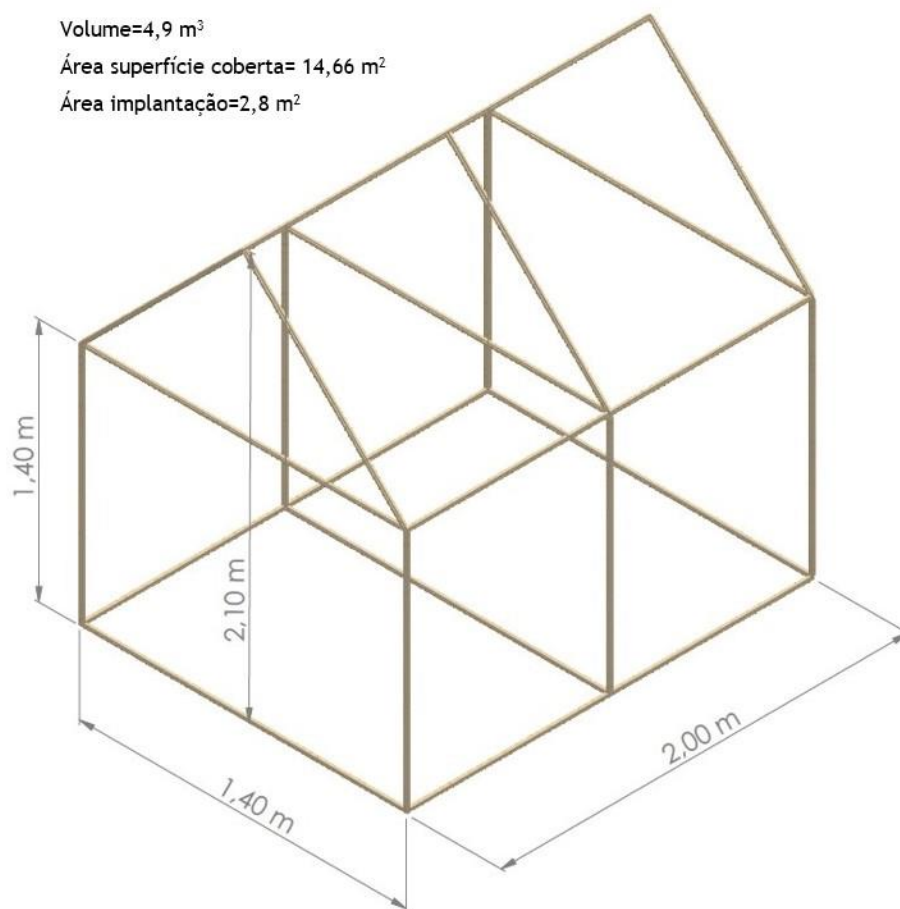


Figura 3.3 - Esboço e dimensões da estufa

3.3.2. Construção

A estrutura da estufa foi construída com barrotes de madeira de abeto com perfil quadrangular de secção 30x30 mm. Depois de se efetuarem os cortes com as respetivas dimensões e ângulos, procedeu-se à montagem com a fixação dos barrotes uns aos outros a ser feita através de diversas ferragens e parafusos.



Figura 3.4 - Fotografia da estrutura da estufa

De forma a efetuar a ancoragem da estufa, foram espetados, até cerca de 20 cm, seis tubos de aço com perfil quadrangular de secção 35x35 mm, um por cada “pé” da estufa. O barrote de madeira de secção inferior é inserido dentro de cada tubo de aço enterrado e aparafusado nele.



Figura 3.5 - Fotografia dos pormenores de fixação com o tubo de aço

De forma a reforçar ainda mais a ancoragem da estufa ao solo, foram dobradas em forma de U, barras de varão nervurado de aço e espetadas no solo de forma a apertar os barrotes da base da estufa de encontro ao solo. Estas fixações foram postas no barrote central da base da estrutura, uma em cada lado. Este pormenor pode ser visualizado na próxima figura.



Figura 3.6 - Fotografia do pormenor de fixação com varão dobrado

Depois de a estrutura instalada procedeu-se ao corte do plástico da cobertura da estufa. Este foi estendido num local amplo e cortado por partes. As dimensões dos cortes foram previamente definidas, dividindo a cobertura da estufa em três partes, telhado e laterais num pedaço completo e depois frente e traseira. Este método foi adotado para maior reaproveitamento do plástico, para não existirem sobreposições e também para se efetuar de forma prática a aplicação e retirada do mesmo.



Figura 3.7 - Fotografia da preparação para corte do plástico

Após o corte das partes de cobertura da estufa chegou o desafio de obter uma forma de fixação do plástico à estrutura da estufa, tendo como principal objetivo a aplicação e remoção fácil, rápida, pouco dispendiosa e sem lhe criar danos. Esta condição foi imposta para que em caso de intempéries ou ventos fortes se pudesse retirar o plástico sem este se danificar, de forma a estufa poder ser reutilizada como objeto de estudo na instituição. Assim sendo, nasceu a ideia de utilizar o tubo rígido (VD) aplicado em instalações elétricas. O conceito consiste em cortar

uma metade de um tubo e encaixá-la num tubo inteiro, com o plástico entre as duas partes, o seu encaixe justo permite que o plástico se segure com relativa eficácia.



Figura 3.8 - Fotografia das partes de fixação do plástico

Na parte de tubo inteira que se fixou na estrutura da estufa foi feito um furo para se conseguir aparafusar ao barrote de madeira, de modo a que a cabeça do parafuso não ficasse sobressaída e interferisse no encaixe entre uma parte e outra. No tubo cortado, efetuou-se um alisamento da superfície de corte com lixa de modo a não provocar danos no plástico da estufa no momento da sua fixação.



Figura 3.9 - Fotografia do sistema de fixação do plástico

Os pedaços do tubo VD, cortados com cerca de 7 cm de comprimento, foram então aparafusados em vários pontos da estrutura da estufa com o objetivo de se obter uma fixação uniforme do plástico, incidindo nos pontos de maior exposição ao vento.



Figura 3.10 - Fotografia da distribuição do sistema de fixação do plástico

Seguiu-se a montagem do plástico que serve de cobertura à estufa e a respetiva fixação. O plástico foi cuidadosamente esticado e coberto na base com terra, para que se diminuísse ao máximo a hipótese de rutura com o efeito do vento, prejudicando assim o decorrer dos testes experimentais efetuados. De seguida é mostrada uma fotografia da estufa com a cobertura montada e corretamente fixada.



Figura 3.11 - Fotografia da estufa completa

3.3. Equipamentos auxiliares

Para efetuar a simulação prática do estudo em causa e a respetiva recolha de dados, foram utilizados vários equipamentos auxiliares, sendo descritas seguidamente as suas funções principais e especificações.

3.3.1. Medição de temperatura

Um dos parâmetros de recolha mais importantes é a temperatura, é este dado que nos vai permitir retirar conclusões quanto ao desempenho do sistema em análise. Para a leitura e recolha das temperaturas foram necessários dois tipos de aparelhos, o data logger de temperatura (PCE-T 1200) que lê vários tipos de termopares e o data logger de temperatura portátil EL-USB-1-LCD da Lascar Electronics.

O data logger de temperatura PCE-T 1200 da PCE instruments (Figura 3.12), lê uma vasta gama de termopares (K, J, T, E, R, S), no entanto, foram apenas utilizados termopares do tipo T, tanto para a recolha de temperatura do solo nos diferentes locais como para os ensaios com o permutador de calor. As vantagens deste aparelho são a capacidade de registo durante um intervalo de tempo desejado e a gravação dos valores através de um cartão SD, para posterior leitura a partir de um computador.



Figura 3.12 - Data logger PCE-T 1200 (PCE instruments) [81].

Já o EL-USB-1-LCD (Figura 3.13) é um data logger de medição portátil com opção de podermos escolher os intervalos de leitura e vem acompanhado de interface via USB para pré programação e leitura de dados recolhidos. Após a recolha de dados com o respetivo programa informático é possível a criação de gráficos ou exportação para excel.



Figura 3.13 - Data logger EL-USB-1-LCD (Lascar Electronics) [82].

3.3.2. Medição da potência

Para a medição da potência ou energia consumida foi utilizado um aparelho de medição de consumos, o E2 Classic Electricity Monitor (efergy). Este aparelho recetor permite a visualização do consumo em tempo real e também a gravação em memória interna, podendo posteriormente exportar para PC através do software fornecido. A sua instalação é fácil, necessitando apenas de abraçar o transmissor no fio (fase) do aparelho cujo consumo se quer analisar e a ligação sem fios entre o transmissor e recetor é feita automaticamente.



Figura 3.14 - Recetor E2 Classic Electricity Monitor e respetivo transmissor [83].

3.3.3. Medição da velocidade

A medição da velocidade de escoamento debitada através dos ventiladores é também um parâmetro importante de recolha para cálculos posteriormente efetuados. A medição foi feita por um anemómetro de hélice, o Testo 416. Este anemómetro possui um visor capaz de transmitir a medição instantaneamente. Para garantir uma correta medição da velocidade de escoamento, o rotor da turbina deve estar localizado no centro geométrico da secção transversal do escoamento.



Figura 3.15 - Anemómetro Testo 416 [84].

3.3.4. Ventilação

Neste trabalho experimental a movimentação do ar é auxiliada através de um sistema de ventilação mecânica para garantir um escoamento de ar unidirecional, contínuo e uniformemente distribuído. Foram utilizados dois ventiladores distintos, um deles utilizado no permutador e o outro utilizado num ensaio para auxiliar a ventilação na estufa de controlo.

O primeiro é um ventilador da marca S&P, modelo TD-800/200 (Figura 3.16), utilizado principalmente para garantir um caudal capaz de suportar as perdas de carga localizadas e em

linha ao longo do permutador. Este ventilador possui um motor monofásico de duas velocidades alimentado com uma tensão de 230 V, apesar disso, nos ensaios efetuados apenas se usou a velocidade máxima. O caudal máximo sem perdas de carga é de 1000 m³/h com uma potência elétrica máxima de 121 W.



Figura 3.16 - Ventilador TD-800/200 (S&P) [85].

O segundo, utilizado na ventilação da estufa de controlo, é um ventilador também da marca S&P, modelo TD-250/100 T (Figura 3.17). Este ventilador dispõe de um motor monofásico, de uma só velocidade e é alimentado por uma tensão de 230 V. O caudal máximo sem perdas de carga é de 240 m³/h e a potência elétrica máxima é de 24 W.



Figura 3.17 - Ventilador TD-250/100 T (S&P).

3.3.5. Aquecimento

De modo a garantir as condições térmicas no interior das estufas, para se efetuarem alguns ensaios, foi necessário o auxílio de dois dispositivos de aquecimento, um para cada estufa. O equipamento utilizado foi um termoventilador cerâmico da marca Equation (Figura 3.18) com termostato digital, potência máxima de 1800 W e com índice de proteção IP21. De modo a obter resultados confiáveis nos ensaios realizados, os dois aparelhos obtidos foram testados para o aquecimento de um espaço, programados com a mesma temperatura, medindo o consumo elétrico dos dois, verificando-se que a diferença é desprezável.



Figura 3.18 - Termoventilador com termostato da marca Equation.

3.4. Instalação experimental integral

A interligação entre a estufa de teste e o permutador de calor ar-solo é a via que o ar percorre para efetuar a troca de calor entre os dois. Um esquema da instalação experimental entre o permutador e a estufa é mostrado na figura seguinte.



Figura 3.19 - Esquema da instalação experimental

As ligações entre o permutador de calor e a estufa são feitas através de tubo flexível, completamente isolado, de modo a atenuar as ganhos/perdas térmicas provenientes do ambiente exterior que possam adulterar os dados recolhidos experimentalmente.

São necessárias reduções/aumentos para as ligações entre: o tubo isolado e entrada do permutador; saída do permutador e entrada do ventilador; saída do ventilador e tubo isolado. Isso acontece pelo facto de os sistemas e acessórios apresentarem diâmetros diferentes.



Figura 3.20 - Fotografia dos acessórios de ligação entre saída permutador e tubo isolado (esquerda) e acessórios de ligação entre permutador, ventilador e tubo isolado (direita)

Também para as ligações do tubo isolado com a estufa (entrada e saída), são necessárias flanges para fixação na estufa com canhão de 127 mm de diâmetro. Elas foram fixadas na parte inferior e superior da estufa, uma na frente e outra na traseira de forma cruzada, podendo-se observar este pormenor na figura 3.19. Foi essencial efetuar o desenho das peças necessárias e posteriormente enviar a uma empresa para realizar o fabrico das mesmas. É de realçar que estas aberturas na estufa de teste onde se encaixam os tubos, foram também feitas na estufa de controlo nos mesmos locais e com a mesma dimensão, promovendo assim a climatização por fenómenos naturais enquanto na estufa de teste é por meio do permutador de calor.



Figura 3.21 - Fotografia da flange com canhão fixada na estufa

Todas as ligações foram seladas com fita de alumínio para garantir que o circuito de ar é efetuado sem perdas. O ventilador e todos os tubos de PVC à superfície foram cobertos com isolamento térmico refletivo de modo a prevenir trocas térmicas com o exterior e refletir a luz solar incidente. Esses pormenores podem ser visualizados nas figuras que mostram a instalação na totalidade. A instalação inicial foi montada com a injeção de ar proveniente do permutador na parte inferior da estufa e o retorno ao permutador na parte superior da estufa, no entanto, no decorrer do ensaio experimental foram testados outros casos. A instalação completa pode ser vista nas figuras seguintes, a estufa de teste (ligada ao permutador) e a estufa de controlo.



Figura 3.22 - Fotografia frontal da instalação



Figura 3.23 - Fotografia lateral da instalação

3.5. Metodologia de ensaio

Apresentada a instalação e os equipamentos auxiliares usados, serão agora apresentados os estudos efetuados neste trabalho experimental. Foram executados dois estudos no âmbito da presente dissertação, um deles foi a monitorização do solo em três locais diferentes, um estudo iniciado por Calado (2016), continuado por Diogo (2017) e Alves (2018) com o intuito de analisar as diferentes temperaturas do solo, a diferentes profundidades, ao longo do ano.

O outro estudo, e que tem sido apresentado com maior enfoque, é a climatização de uma estufa agrícola através de um permutador de calor ar-solo, em que é efetuada a variação de diferentes parâmetros e posteriormente recolhidos os dados de modo a que se possam retirar conclusões quanto ao desempenho do sistema.

3.5.1. Monitorização da temperatura do solo

Para análise da variação da temperatura do solo com o decorrer da profundidade, foi realizada uma recolha de temperaturas do solo em três locais da Universidade da Beira Interior, na cidade da Covilhã. Os três locais de implementação das sondas estão representados na figura seguinte. A sonda A, denominada por “Reitoria_Baixo”, localiza-se na zona da reitoria da Universidade da Beira Interior, a uma altitude de 711 m de acordo com as coordenadas GPS 40°16’31” N 7°30’37” W. A sonda B, denominada por “Reitoria_Cima”, está localizada a cerca de 30 metros da sonda A, segundo as coordenadas GPS 40°16’30” N 7°30’38” W, a uma altitude de 716 m. Já a sonda C, denominada por “ Engenharias” está localizada na extremidade sul da Faculdade de

Engenharia, junto ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), de acordo com as coordenadas GPS 40° 16' 41" N 7° 30' 46" W a uma altitude 662 m [53].



Figura 3.24 - Localização geográfica das sondas

Os dados são recolhidos pelas sondas, de metro a metro, entre 1 e 5 m de profundidade. Os fios de ligação aos termopares são protegidos por um tubo rígido VD (PVC) e por cada metro foi feito um furo para colocação do termopar, para estes ficarem diretamente em contato com o solo. O fio termopar utilizado nas sondas é do tipo T (Omega Engineering Inc., PRT24) e permite a leitura de temperaturas entre -270 °C a 370 °C. Para melhor percepção da sonda utilizada para recolha dos dados na superfície terrestre é mostrado um esquema exemplificativo na figura seguinte.

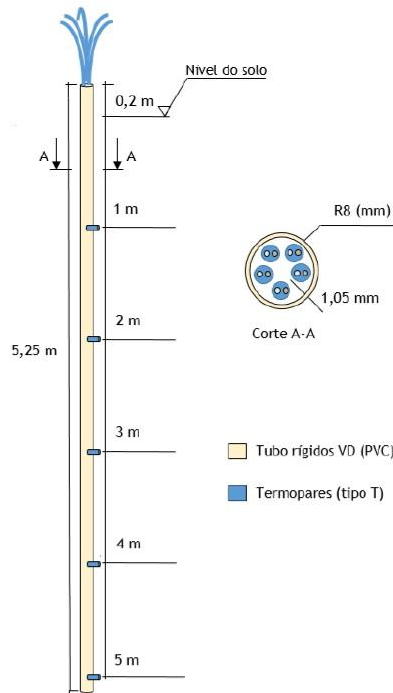


Figura 3.25 - Esquema das sondas implementadas [53].

A recolha das temperaturas do solo e temperatura ambiente decorreu durante todo o ano, semanalmente entre as 12:00 e as 14:00 horas, com o equipamento de medição de temperatura data logger PCE-T 1200. Após a chegada ao local de medição, eram ligados os termopares do permutador de calor e o de leitura de temperatura ambiente ao aparelho, efetuando-se um compasso de espera de cerca de cinco minutos para a estabilização dos valores, após isso eram registados os valores. As medições de temperatura ocorreram desde o dia 24 de setembro de 2018 até ao dia 27 de maio de 2019. A recolha destes dados possibilita a análise do comportamento térmico do solo a diferentes profundidades, sob diferentes estações do ano em três locais distintos.

3.5.2. Ensaio com a estufa e o permutador de calor ar-solo

O estudo experimental realizado visa investigar a possibilidade de utilização de um permutador de calor ar-solo na climatização de uma estufa agrícola, analisando o desempenho térmico do sistema. Os ensaios foram efetuados entre 3 abril de 2019 e 13 de maio de 2019, aproveitando-se os dias mais frios para se testar o aquecimento da estufa e os dias mais quentes para se testar o arrefecimento. A duração de cada ensaio foi de 24 horas para perceber o estado de saturação térmica do permutador após longas horas de funcionamento. Os valores foram registados pelos aparelhos de medição com intervalo de 10 minutos.

Os valores de temperatura medidos no permutador de calor foram registados através de 5 termopares do tipo T, localizados ao longo do seu interior e um na sua saída. As fichas de ligação dos termopares estão todas localizadas à superfície, garantindo fácil acesso e ligação

simultânea ao data logger (PCE-T 1200) de todos os termopares. As localizações dos termopares no interior do permutador de calor são mostradas na figura 3.26.

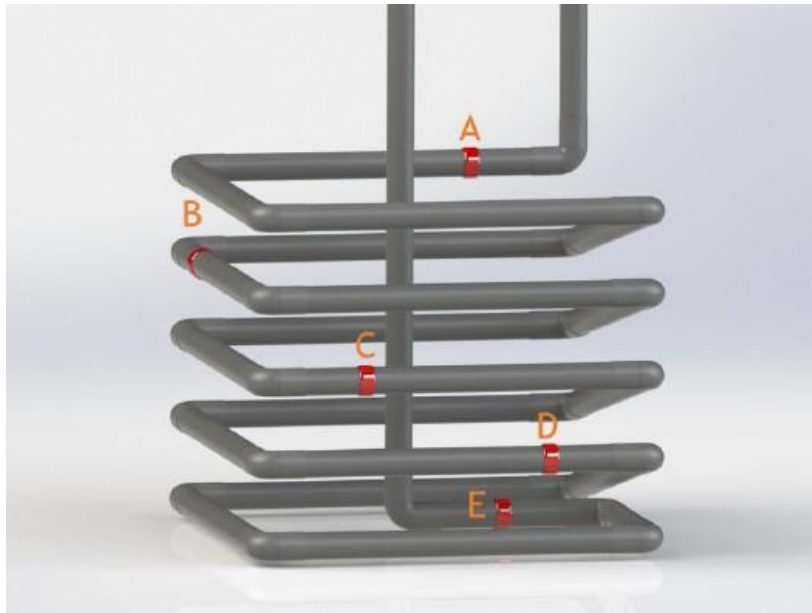


Figura 3.26 - Localizações dos termopares no permutador de calor [53].

Os termopares inseridos no interior do permutador foram colocados quando foi instalado no sub-solo, não sendo possível a mudança de localização das leituras de temperatura. As localizações dos mesmos foram idealizadas com o propósito de analisar a variação da temperatura do ar ao longo do comprimento total do permutador. Assim, relativamente à entrada, o termopar (A) encontra-se a 3,20 m, o (B) a 8,73 m, o (C) a 14,26 m, o (D) a 19,24 m e o último (E) a 24,77 m [53].

Já os valores registados no interior das estufas foram obtidos a partir de seis data logger (EL-USB-1-LCD), divididos em três unidades, para a estufa de teste, e em igual número para estufa de controlo. A localização dos termopares no interior da estufa é no seu centro geométrico, dispostas por várias alturas ao solo, ilustradas na figura seguinte. O primeiro encontra-se contíguo ao solo (A), o segundo (B) a 75 cm e o terceiro (C) a 150 cm. A escolha da localização dos aparelhos de leitura de temperatura foi idealizada de forma a obter uma média aproximada da temperatura interior e foi limitada pelo número de aparelhos de medição disponíveis.

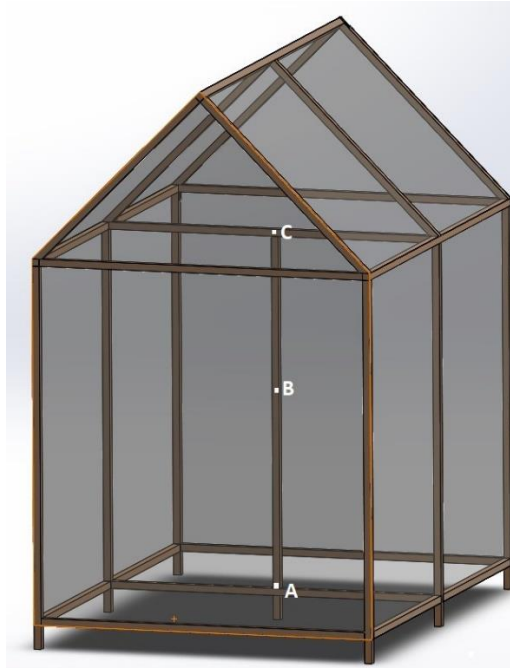


Figura 3.27 - Localização dos termopares na estufa

Para a fixação do data logger na localização pretendida foi necessário encontrar um método que fosse de aplicação e extração fácil, para recolher dados e voltar a colocar caso fosse necessário efetuar outro teste. Assim, o método encontrado foi o aproveitamento da outra metade do tubo VD, usado para a fixação do plástico de cobertura à estrutura da estufa, em que esta parte é aparafusada no barrote de madeira e o data logger que apresenta uma forma aproximadamente circular, é encaixado e mantém-se fixo (Figura 3.28).



Figura 3.28 - Fotografia do pormenor de fixação do data logger na estufa

Para proteger os data loggers da radiação solar incidente, que possivelmente adulteraria os dados recolhidos, foi instalada uma proteção em isolamento térmico refletivo afastando assim radiação incidente e garantindo sombreamento ao aparelho de recolha de dados. O pormenor descrito pode ser visualizado na seguinte.



Figura 3.29 - Fotografia do pormenor de proteção de radiação solar do data logger

Um outro data logger (EL-USB-1-LCD) foi necessário para registar a temperatura do ambiente exterior. A este parâmetro recolhido é dada especial atenção por servir de termo de comparação às grandezas dos valores obtidos do interior das estufas e do subsolo mais concretamente no interior do permutador de calor. O meio ambiente está repleto de fatores que podem influenciar a leitura da temperatura, a exposição a ventos e à radiação solar são os principais a ter em consideração. Para elevar a transparência dos dados recolhidos e evitar oscilações repentinas, foi construído um resguardo em volta do aparelho de medição para melhorar a sua proteção contra esses fatores. O conceito utilizado para uma cúpula de proteção foi a utilização de um garrafão de água, cortando-o ao meio, reutilizando a parte superior em que o data logger é fixo no centro (Figura 3.30), assegurando assim a fácil retirada para o descarregamento dos valores. No entanto, não se deseja criar um ambiente fechado, por isso, apesar de estar a base totalmente aberta, foram feitos vários furos com 10 mm de diâmetro para o ambiente no interior da cúpula de proteção ser congénere com o ambiente exterior. Apesar de se tentar aplicar à sombra a cúpula de proteção foi envolvida com fita de prata com elevadas propriedades refletivas caso houvesse alguma exposição à radiação solar. Além disso foi ainda aplicado isolamento térmico refletivo na área circundante. O sistema completo é mostrado na figura 3.31.



Figura 3.30 - Fotografia do pormenor de fixação do data logger da temperatura ambiente



Figura 3.31 - Fotografia da proteção do data logger da temperatura ambiente

Foram realizados ensaios divididos em dois grandes grupos. Em vazio, em que a estufa de teste foi climatizada através do permutador de calor ar-sole e a estufa de controlo estava apenas sujeita a fenómenos naturais, permitindo avaliar “in loco” a diferença resultante da um permutador de calor. O outro, em aquecimento, consistiu na aplicação de dois termoventiladores iguais, um em cada estufa, definindo um “set-point” para a temperatura, igual nas estufas e que se mediu a energia consumida pelos dois aparelhos de aquecimento, de modo a verificar se, na estufa auxiliada pelo permutador de calor, o consumo era menor. Dentro do que foi dito atrás, fizeram-se também ensaios em circuito fechado e em circuito aberto, alterando entre eles algumas variáveis. A principal diferença entre estes ensaios foi que no ensaio em circuito fechado, o ar era aspirado da estufa e devolvido à estufa após a circulação pelo permutador de calor, enquanto em circuito aberto, o ar era aspirado do ar ambiente e

devolvido para o interior da estufa após a circulação pelo permutador de calor. Também outras variáveis foram alteradas com intuito de se perceber as variações repercutidas nos dados recolhidos. Para melhor compreensão dos ensaios realizados será apresentada a seguir uma tabela com um resumo das características de todos os que foram efetuados.

A tabela começa por ser dividida por grupo de ensaio, em vazio (A) e aquecimento (B), numerando cada ensaio. O nome das estufas foi abreviado para (*estufa 1*) correspondente à estufa de teste e (*estufa 2*) para a estufa de controlo. O tipo de circuito utilizado indica se o permutador foi usado em circuito aberto (CA) ou circuito fechado (CF). A configuração diz-nos se o tubo que sai do permutador de calor e injeta ar na estufa, está conectado na parte inferior da estufa, melhorando o seu desempenho de aquecimento (aquec.) ou se está conectado na parte superior melhorando o desempenho de arrefecimento (arref.). O termo ventilação indica se é utilizado ventilador (forçada) ou se não é usado ventilador (natural). O caudal indica, como o próprio nome sugere, o caudal utilizado. Por último, o “Tset” indica o valor alvo de temperatura, inserido no termostato, que os termoventiladores tentam assegurar continuamente.

Tabela 3.1 - Tabela das características dos ensaios

Ensaio	Estufa 1					Estufa 2		
	Tipo de circuito	Configuração	Ventilação	Caudal (m ³ /h)	Tset (°C)	Ventilação	Caudal (m ³ /h)	Tset (°C)
A1	CA	arref.	forçada	63	-	Natural	-	-
A2		aquec.		63	-	Forçada	63	-
A3		arref.		72	-	Forçada	72	-
A4	CF	aquec.		63	-	Natural	-	-
B5	CF	aquec.	forçada	63	12	Natural	-	12
B6				63	20	Natural	-	20
B7	CA			63	18	Forçada	63	18

3.5.2.1. Ensaio em vazio

Os ensaios em vazio, em que a estufa de teste é climatizada através do permutador de calor e a estufa de controlo está apenas sujeita a fenómenos naturais tem como principal objetivo avaliar o desempenho do permutador ao comparar as temperaturas no interior das duas estufas.

O ensaio A1 e A4 são realizados com características semelhantes, diferindo apenas no tipo de circuito e na configuração utilizada, o A1 em circuito aberto e configuração apropriada para arrefecimento e A2 em circuito fechado e configuração para aquecimento. De realçar que, em circuito fechado, não foi efetuado nenhum ensaio com configuração para arrefecimento por se

esperar um pior desempenho, visto que as temperaturas no interior das estufas se esperam elevadas nos períodos que se necessita o arrefecimento (meses quentes).

Os ensaios A2 e A3 são realizados ambos em circuito aberto, variando entre os dois a configuração e o caudal. Face aos anteriores descritos, estes diferenciam-se por ter sido adicionado um ventilador auxiliar na estufa de controlo, com a tentativa de potenciar as trocas de calor com o exterior. O ventilador TD-250/100 T foi acoplado na estufa de controlo e preparado para garantir o mesmo caudal fornecido no circuito entre o permutador e a estufa. Após a leitura da velocidade do ar e respetivo caudal no circuito da estufa 1, foi implementada, após tentativa e erro, uma restrição em cartão, na entrada do ventilador da estufa 2, para se equipararem os dois caudais. Este processo foi necessário devido ao ventilador debitar caudal superior ao pretendido.

Para a leitura correta e sem perturbações do caudal no ventilador usado na estufa 2 foi adicionado um pedaço de tubo PVC com cerca de 50 cm e inserida a sonda telescópica do anemómetro a cerca de 30 cm da saída do ventilador (Figura 3.32).



Figura 3.32 - Fotografia da adição de tubo PVC ao ventilador da estufa de controlo



Figura 3.33 - Fotografia do ventilador implementado na estufa de controlo

No teste A3 foi adicionado um segundo ventilador (TD-250/100 T) para aumentar o caudal no circuito do permutador de calor, com o intuito de testar o desempenho do permutador com diferentes caudais, assim sendo foi posicionado na entrada deste um ventilador auxiliar (Figura 3.34), aumentando o caudal para $72 \text{ m}^3/\text{h}$. Para evitar a entrada de insetos ou outros objetos foi aplicada uma rede de proteção à entrada do ventilador.



Figura 3.34 - Fotografia do segundo ventilador no permutador de calor

Como o caudal foi aumentado no circuito da estufa 1, no teste A3 foi necessário igualar o caudal na estufa 2 para o mesmo teste. Para facilitar a reposição de igualdade de caudais nos vários ensaios efetuados foi construída outra restrição em cartão para igualar o caudal de $72 \text{ m}^3/\text{h}$. Assim sendo, ficaram disponíveis dois restritores, um para garantir um caudal de $63 \text{ m}^3/\text{h}$, com velocidade de escoamento do ar de $4,0 \text{ m/s}$ e o outro garantindo um caudal de $72 \text{ m}^3/\text{h}$ com

velocidade de escoamento do ar de 4,5 m/s. O pormenor das restrições construídas pode ser visto na figura seguinte.



Figura 3.35 - Fotografia do pormenor das restrições de caudal

3.5.2.2. Ensaio em aquecimento

Os ensaios em aquecimento foram efetuados com a presença de um termoventilador por cada estufa. O principal objetivo destes testes experimentais consiste em recolher o consumo elétrico de cada termoventilador e comparar a diferença de gastos energéticos entre a estufa auxiliada pelo permutador de calor e a estufa de controlo.

Foram realizados três ensaios, dois deles (B5 e B6) idênticos em que apenas se altera um parâmetro que é a programação da temperatura do termostato. O ensaio B5 foi programado para uma temperatura de 12 °C com o intuito de simular um ambiente de manutenção de uma horticultura em estufa nos períodos de inverno. Já para o ensaio B6, aumentou-se a temperatura para 20 °C, pretendendo observar a resposta do sistema a uma temperatura considerada elevada na climatização de estufas.

No ensaio B7 foi selecionada uma temperatura padrão de 18 °C nos termoventiladores. Este teste conta com a particularidade de ser adicionado um ventilador na estufa de controlo, igualando os caudais de ventilação nas duas estufas. O processo de implementação deste ventilador foi análogo ao mostrado na secção anterior. O propósito deste ensaio é o aumento da circulação de ar na estufa de controlo, tentando criar uma comparação “justa” entre as duas estufas. Ao contrário dos dois anteriores, este ensaio é realizado em circuito aberto.

3.6. Nota conclusiva

Neste capítulo foram descritos e caracterizados todos os aspetos construtivos da instalação experimental incluindo a localização da mesma. As decisões tomadas foram também abordadas e fundamentadas sinteticamente. Os equipamentos auxiliares usados no decorrer dos ensaios experimentais foram igualmente descritos, caracterizados e explicada a sua contribuição para a instalação.

Quanto aos testes experimentais, decorreram dois em simultâneo. O primeiro consistiu na monitorização de temperatura do solo em três locais diferentes procurando conhecer o comportamento térmico do solo à medida que aumenta a distância à superfície. O outro teste experimental foi a comparação térmica de duas estufas exatamente iguais, sendo que uma é acoplada a um permutador de calor ar-solo. O principal objetivo é perceber se há vantagens do ponto de vista térmico ao utilizar-se o sistema.

Capítulo 4

4. Análise e discussão de resultados

4.1. Introdução

Depois de apresentados os testes efetuados e o procedimento experimental dos vários ensaios, terá lugar no decorrer deste capítulo a exibição, análise e discussão dos resultados recolhidos. O estudo primeiramente apresentado será o da monitorização da temperatura do solo em três localizações diferentes, apresentando os dados através de gráficos para melhor percepção dos resultados obtidos. A apresentação de resultados para o estudo da climatização de uma estufa agrícola por meio de um permutador de calor ar-solo desenrolar-se-á da mesma forma, resumindo graficamente o seu desempenho térmico e energético.

4.2. Monitorização da temperatura do solo

O presente teste experimental tem como objetivo a recolha e análise de dados do solo, metro a metro, até 5 metros de profundidade. O teste experimental permite conhecer o comportamento da superfície terrestre ao longo de várias estações do ano, em três localizações diferentes, referidas na secção 3.5.1. Para o efeito foram recolhidos semanalmente os dados entre 24 de setembro de 2018 e 27 de maio de 2019 e são apresentados e discutidos na presente secção. Nos gráficos apresentados estão inseridas as temperaturas médias mensais de cada patamar de profundidade, correspondendo à temperatura ambiente (0 m), à temperatura a 1 m de profundidade (1 m) sequencialmente até ao último patamar de profundidade (5 m).

Na figura 4.1 são mostrados os resultados obtidos relativamente à localização A - “Reitoria Baixo”.

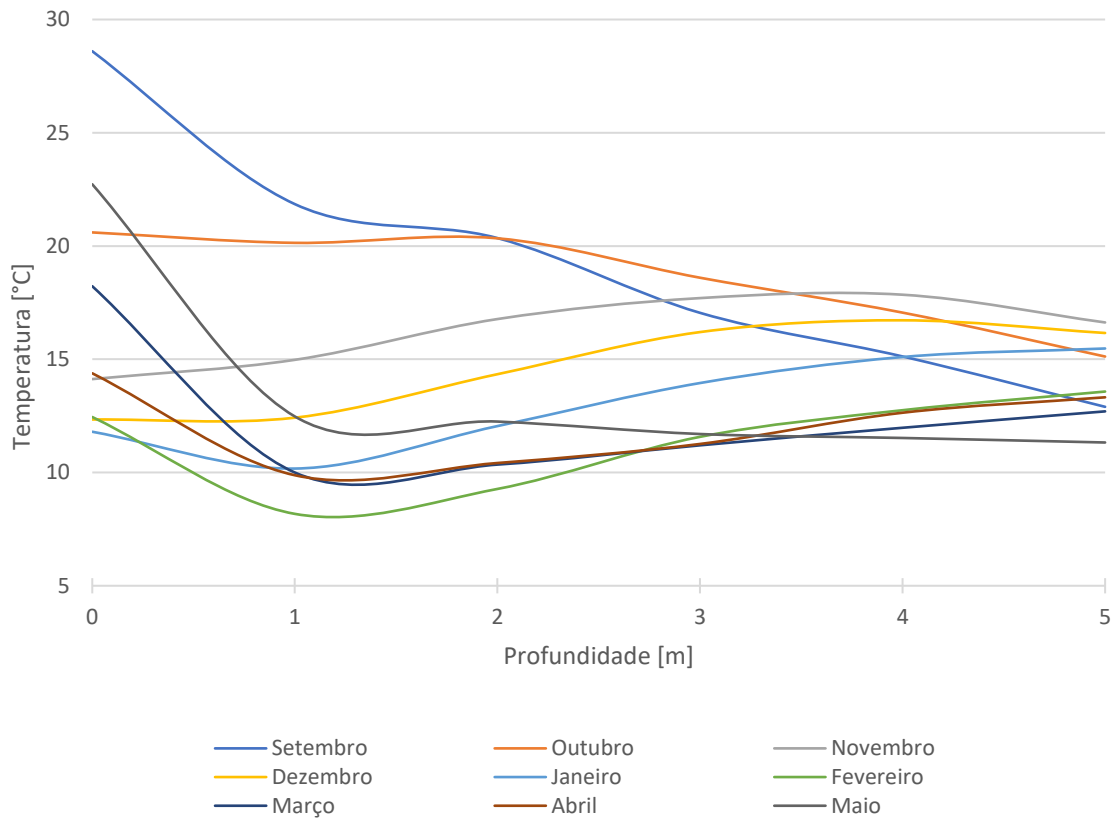


Figura 4.1 - Temperatura do solo ao longo da profundidade no local A - “Reitoria Baixo”

Observando o gráfico verifica-se prontamente a influência da profundidade nas temperaturas medidas, independentemente da época do ano. A tendência é claramente para a aproximação dos valores de temperatura do solo à medida que a profundidade aumenta, enquanto que a profundidades próximas da superfície terrestre se observa o efeito das estações do ano. Pode-se assim afirmar, que a amplitude térmica vai diminuindo com o aumento da profundidade, prova disso é que a amplitude térmica entre setembro e maio a 1 m de profundidade foi de 14,6 °C e a 5 m de profundidade foi de 7,4 °C.

Avançando, é mostrado na figura seguinte o gráfico obtido a partir dos dados recolhidos na localização B - “Reitoria Cima”.

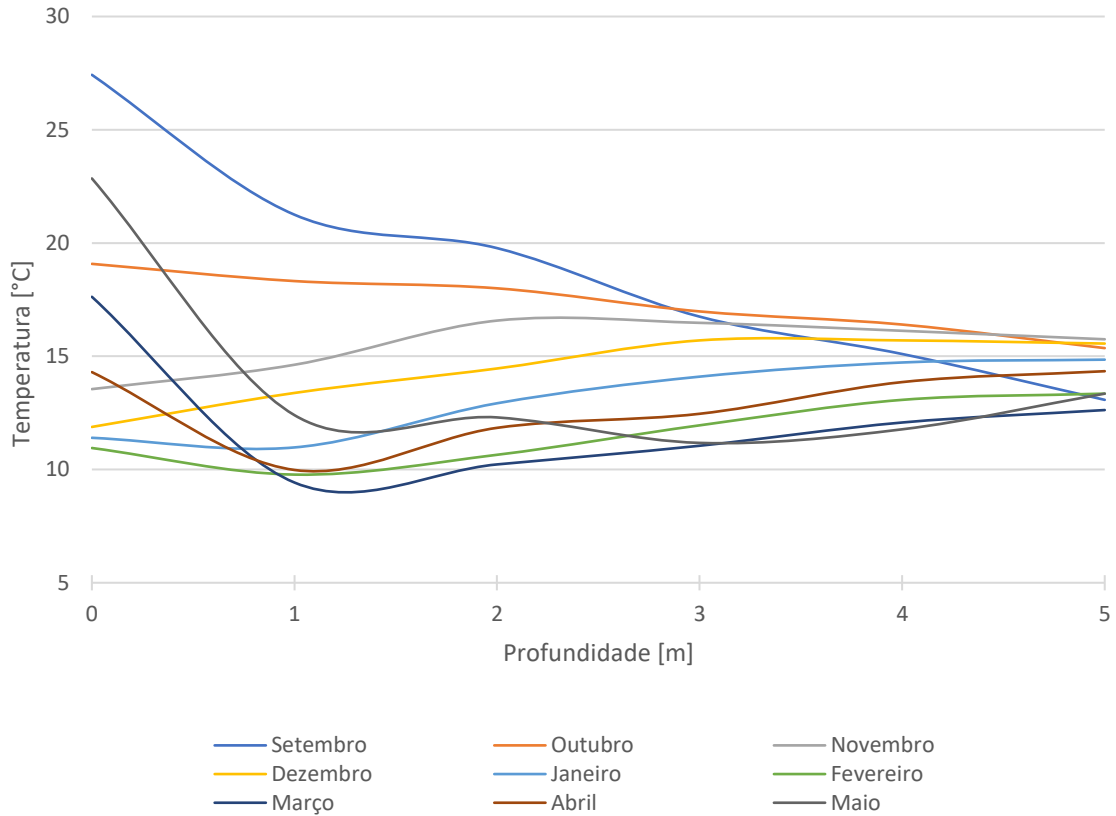


Figura 4.2 - Temperatura do solo ao longo da profundidade no local B - “Reitoria Cima”

Ao observar o gráfico, depreende-se também a tendência para a uniformização da temperatura com o aumento da profundidade. Apesar do local B estar situado num socalco com alguma exposição solar lateral, está também mais sombreado, esse facto poderá explicar algumas diferenças das temperaturas recolhidas do solo. No entanto, a diminuição da amplitude térmica com o aumento da profundidade é igualmente visível com valores máximos de amplitude de 11,4 °C no patamar de 1 m de profundidade e 7,6 °C nos 5 m de profundidade.

Prosseguindo, na próxima figura é mostrado o gráfico obtido a partir dos dados recolhidos na localização C - “Engenharias”.

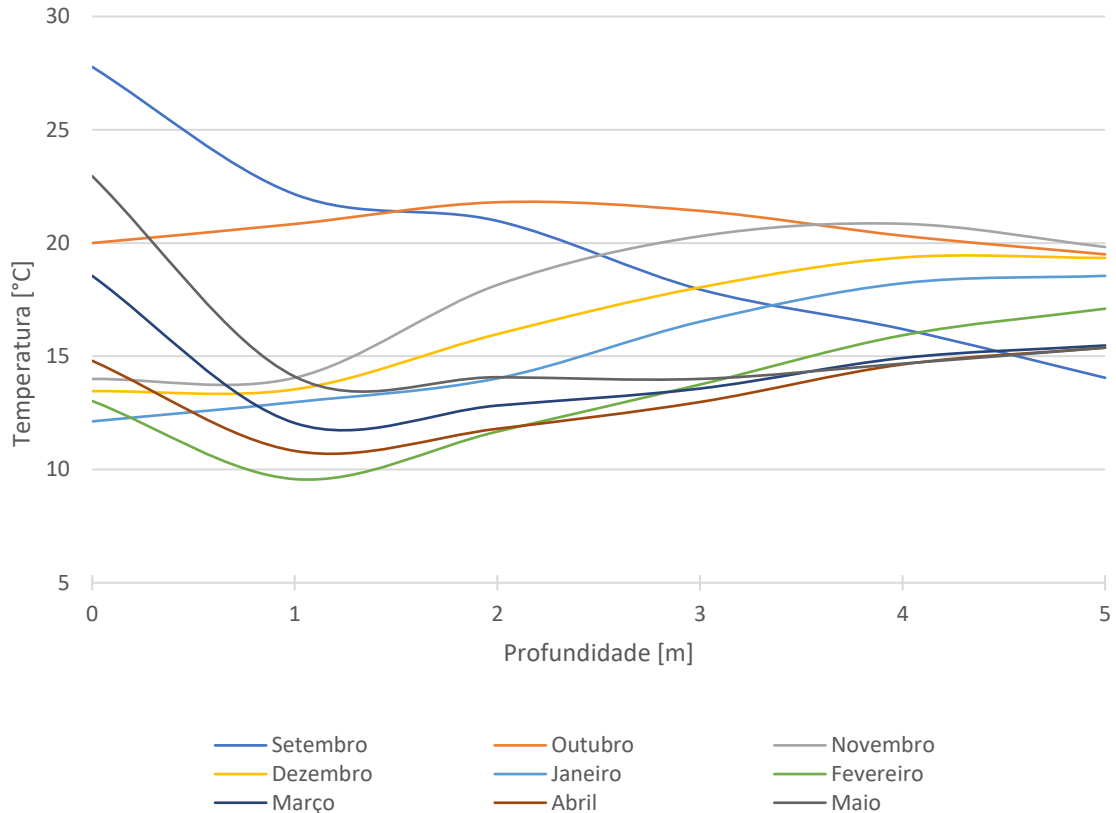


Figura 4.3 - Temperatura do solo ao longo da profundidade no local C - “Engenharias”

Observando o gráfico representado na figura 4.3, constata-se que a tendência das curvas é de aproximação umas das outras com o aumento da profundidade, ou seja, à semelhança dos outros locais citados, a amplitude térmica vai diminuindo com o aumento da profundidade. A 1 m de profundidade foi registrada uma amplitude máxima de 14,5 °C e a 5 m de profundidade uma amplitude de 5,9 °C.

Falando globalmente dos resultados dos três locais analisados, pode-se dizer que todos eles vão de encontro às expectativas, visualizando-se claramente os pressupostos teóricos. Apesar de se encontrarem algumas diferenças entre os valores lidos, estes podem ser explicados por vários motivos, nomeadamente, a composição dos solos, a sua condutividade térmica, diferença de altitude e exposição solar. Em todos os gráficos apresentados verifica-se uma grande diferença de temperaturas entre o ambiente e a superfície terrestre, nos meses quentes, prevendo-se então um bom potencial do solo para arrefecimento. Essas diferenças não são tão visíveis nos meses frios pela simples razão das medições de temperatura do solo serem efetuadas durante o dia quando a temperatura é mais elevada. Caso as medições fossem realizadas durante o período noturno, quando as temperaturas estão mais baixas, verificar-se-ia o elevado potencial do solo como fonte quente.

4.3. Climatização de uma estufa por meio de um permutador de calor ar-solo

Esta secção será dedicada à apresentação de resultados dos ensaios efetuados entre as estufas e o permutador de calor. Os ensaios realizados unicamente com climatização a partir do permutador de calor (ensaios do grupo A), são apresentados na secção 4.3.1 onde vão ser comparadas as diferenças de temperatura entre as duas estufas e também na secção 4.3.2, em que vai ser analisada a potência do permutador de calor. Já a secção 4.3.3 vai ser dedicada à apresentação das diferenças de potências consumidas pelos termoventiladores (ensaios do grupo B). Relembro que as características de todos os ensaios podem ser consultadas na tabela (3.1), presente na secção 3.5.2.

4.3.1. Comparação de temperaturas entre as duas estufas

Os resultados dos ensaios realizados do grupo A, nomeadamente A1, A2, A3 e A4, serão aqui apresentados. Para melhor perceção, foram obtidos gráficos a partir dos dados recolhidos. No gráfico serão expostas as temperaturas médias horárias, obtidas da média de temperatura dos três data loggers, localizados no interior da estufa acoplada ao permutador de calor ($T_{m\acute{e}dia_1}$) e da estufa de controlo ($T_{m\acute{e}dia_2}$). O mesmo processo foi também efetuado com a temperatura ambiente exterior (T_{amb}) e temperatura de saída do permutador ($T_{out_permutador}$). A figura que se segue exhibe o gráfico relativo ao ensaio A1.

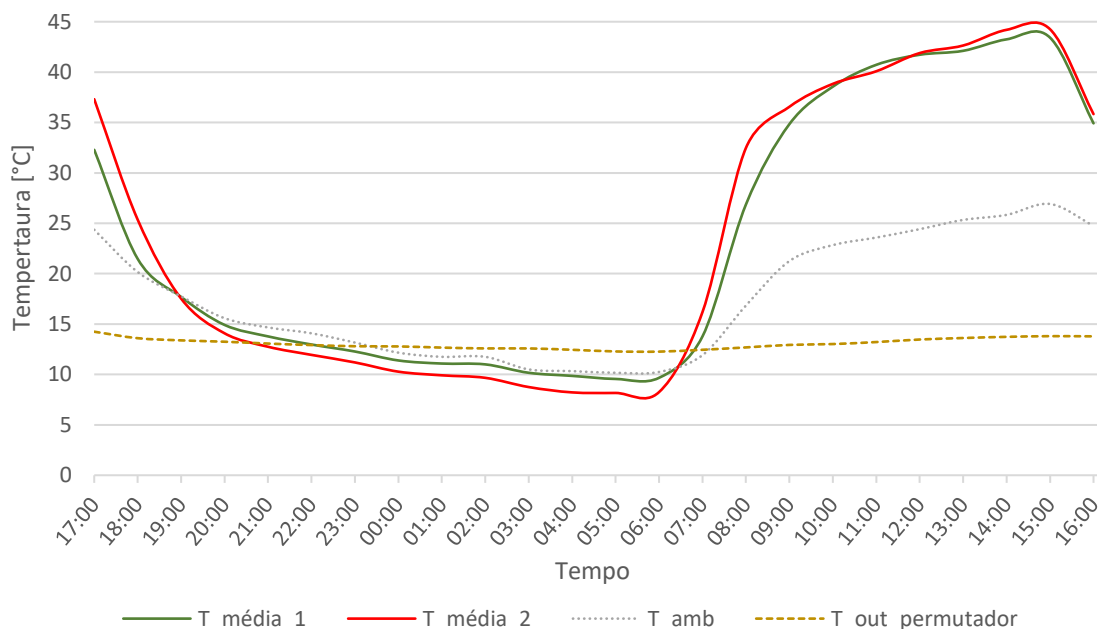


Figura 4.4 - Temperaturas no ensaio A1

Na observação do gráfico da figura 4.4 consegue-se retirar prontamente uma conclusão, o permutador de calor tem influência na temperatura interior da estufa de teste. A temperatura no interior da estufa 1, nas horas mais quentes é mais baixa que na estufa 2 e quando a temperatura ambiente desce durante a noite, a temperatura no interior da estufa 1 é mais elevada que na estufa 2, ou seja, existe arrefecimento e aquecimento pelo permutador de calor. De notar também que a temperatura à saída do permutador se mantém praticamente constante durante as 24 horas de ensaio, querendo dizer que as trocas térmicas são efetuadas sem alteração da temperatura do permutador. A média da diferença de temperatura da estufa 1 em relação à estufa 2, em períodos de aquecimento e arrefecimento foi de $+1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, respetivamente. Realço que a configuração utilizada para este ensaio foi de arrefecimento e em circuito aberto.

A figura seguinte é relativa ao ensaio A2, realizado em circuito aberto, configuração de aquecimento e ventilação forçada na estufa 2.

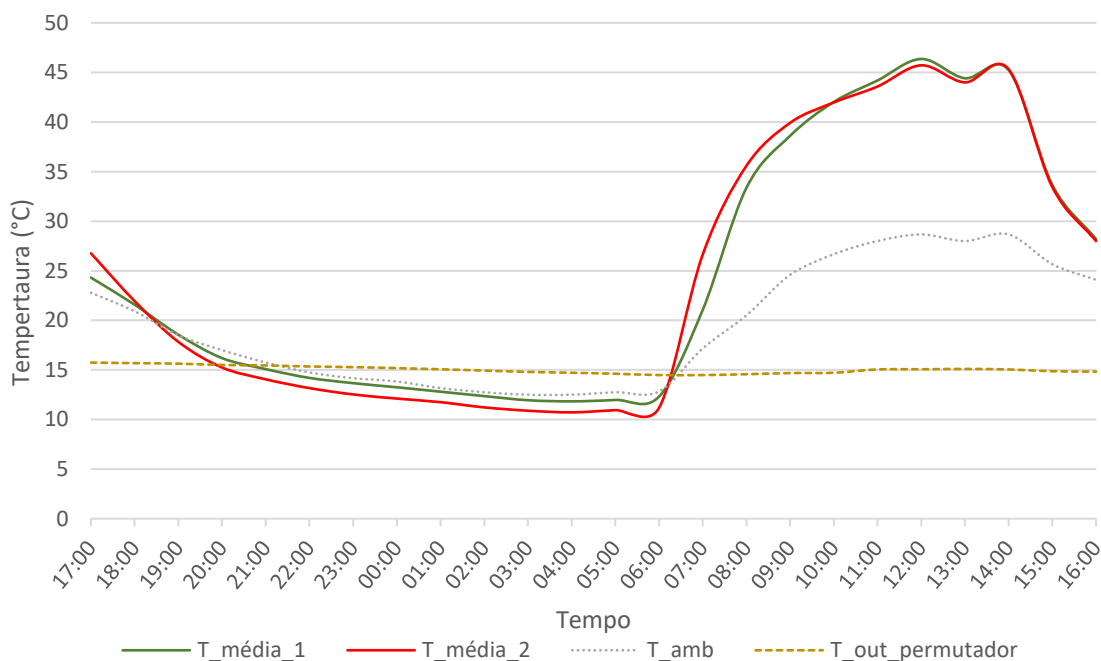


Figura 4.5 - Temperaturas no ensaio A2

Relativamente a este ensaio, tal como no anterior, consegue-se visualizar a diferença de temperaturas entre a estufa 1 e a estufa 2 e perceber a passagem de fases entre aquecimento e arrefecimento. O efeito da ventilação é visível neste ensaio, existindo menos diferença de temperatura. A média da diferença de temperatura da estufa 1 em relação à estufa 2, em períodos de aquecimento e arrefecimento foi de $+1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, respetivamente. A configuração de aquecimento foi usada neste caso.

O gráfico que se pode visualizar de seguida é relativo ao ensaio A3 realizado em circuito aberto, com configuração de arrefecimento e aumento de caudal no circuito do permutador de calor (igualado na ventilação forçada da estufa 2).

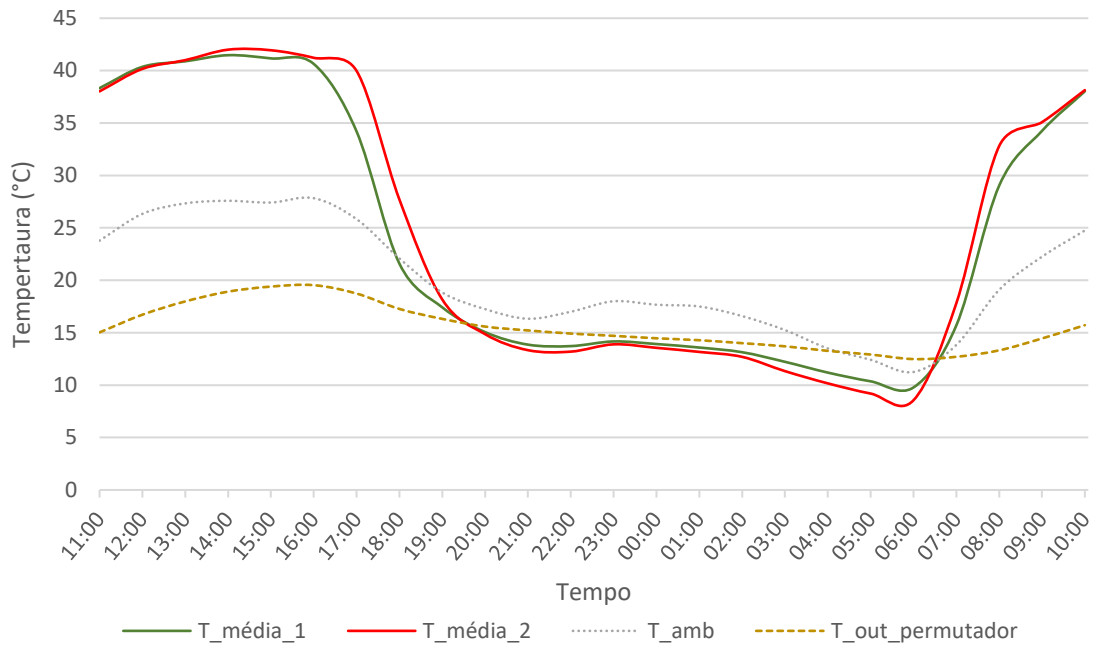


Figura 4.6 - Temperaturas no ensaio A3

O gráfico do ensaio A3 mostra-nos a oscilação da temperatura de saída do permutador. Isto deve-se ao aumento do caudal no permutador de calor, indicando que é demasiado elevado para as trocas de calor se efetuarem completamente. No entanto, consegue-se visualizar que a estufa 1 em relação à estufa 2, tem menor temperatura nos períodos de calor e maior temperatura no arrefecimento noturno. A média da diferença de temperatura da estufa 1 em relação à estufa 2, foi de +0,7 °C em períodos de aquecimento e de -1,7 °C em períodos de arrefecimento.

Relativamente ao ensaio A4 é apresentado o gráfico obtido na próxima figura. De realçar que, em relação aos ensaios anteriores, este foi realizado em circuito fechado e em configuração de aquecimento.

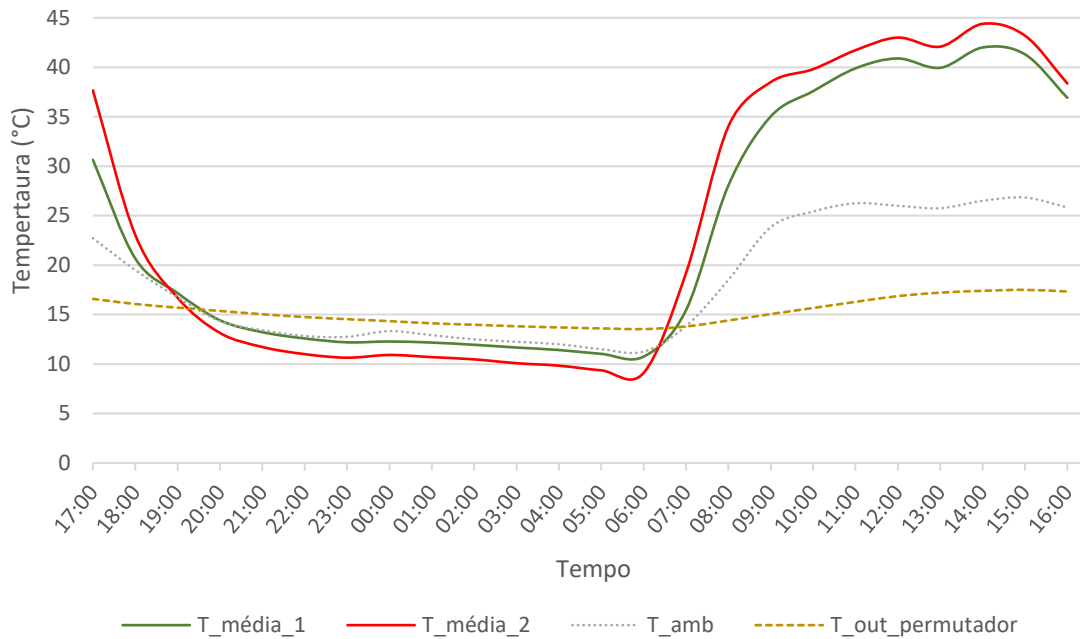


Figura 4.7 - Temperaturas no ensaio A4

Este ensaio, à semelhança dos já realizados, indica que o permutador de calor tem capacidade para aquecer ou arrefecer um espaço. São visíveis as diferenças de temperatura entre uma estufa e outra e as passagens pelos períodos quentes e frios das 24 horas de teste. A média da diferença de temperatura da estufa 1 em relação à estufa 2 em períodos de aquecimento foi de +1,5 °C e em arrefecimento -3,2 °C. A explicação para este ensaio ser bem-sucedido em termos de arrefecimento pode ter a ver com o facto de estar um dia nublado e consequentemente haver menor radiação solar incidente.

4.3.2. Potência de aquecimento/arrefecimento do permutador de calor

Nesta secção são apresentados os resultados dos cálculos da potência de aquecimento/arrefecimento instantânea e o coeficiente de desempenho (COP) do permutador de calor para os quatro ensaios do grupo A. A potência é obtida a partir da expressão matemática (2.4) presente na secção 2.4.4., sendo consideradas para o seu cálculo as temperaturas à saída da estufa e as temperaturas do ar à saída do permutador (circuito fechado). Já em circuito aberto são tidas em conta as temperaturas ambiente e as temperaturas à saída do permutador. O sinal do valor da potência (positivo ou negativo) indica se o permutador está em aquecimento ou arrefecimento, respetivamente. Na expressão para o seu cálculo, os valores da massa específica do ar (ρ) e o calor específico (c_p) foram apurados a partir da temperatura média do ar (T_m), entre a entrada e a saída do permutador.

O COP foi calculado a partir da expressão matemática (2.6), presente na secção 2.4.4 e o seu sinal indica, igualmente como para a potência, se o permutador está a aquecer ou arrefecer o ar.

Nas figuras seguintes podem ser visualizados os gráficos de potência e COP relativamente aos ensaios A1, A2, A3 e A4, respeitando esta ordem.

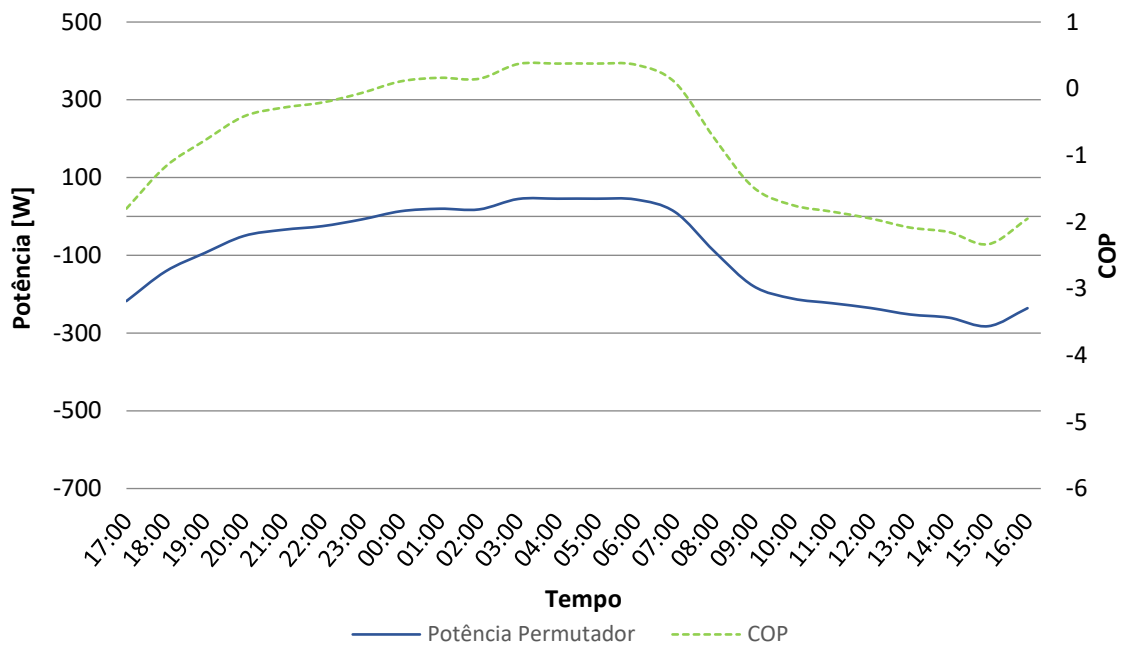


Figura 4.8 - Potência e COP do permutador de calor no ensaio A1

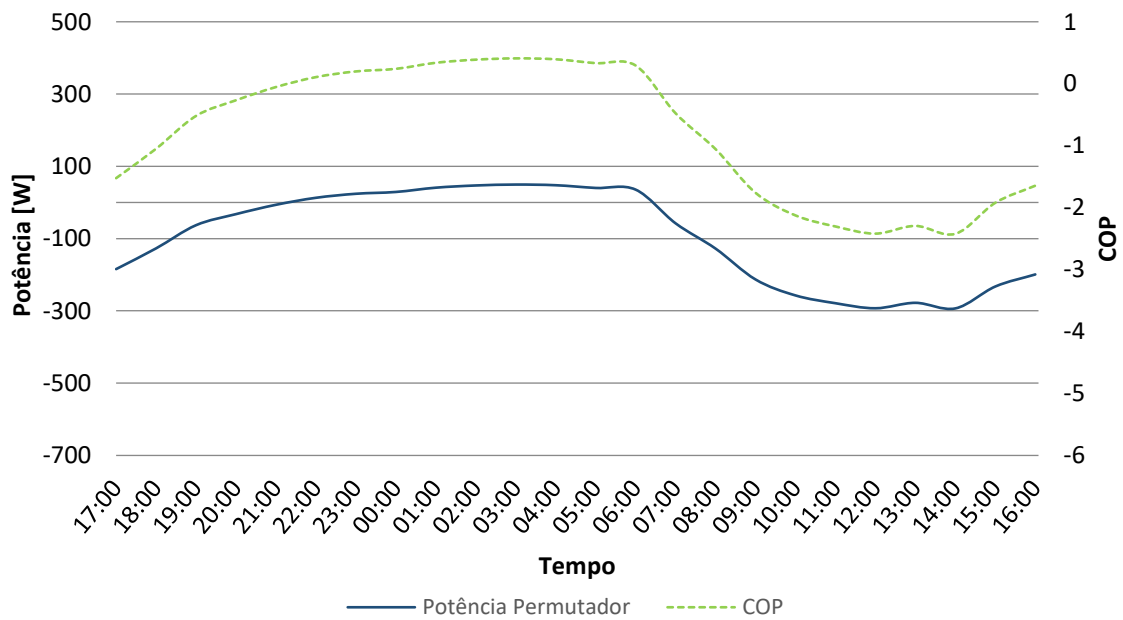


Figura 4.9 - Potência e COP do permutador de calor no ensaio A2

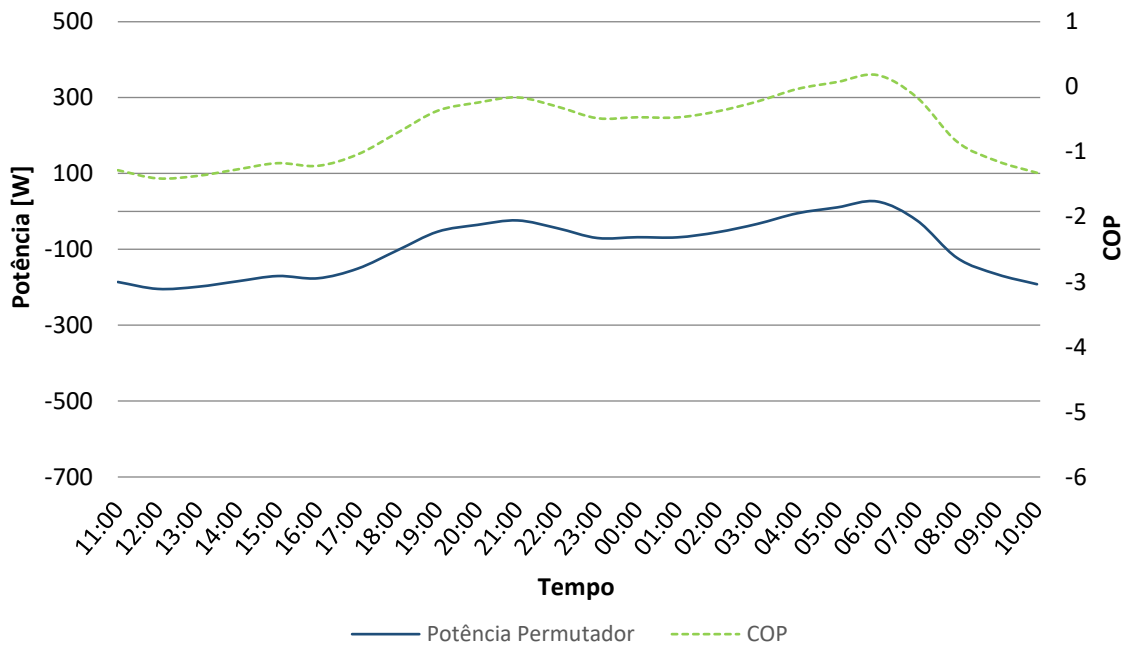


Figura 4.10 - Potência e COP do permutador de calor no ensaio A3

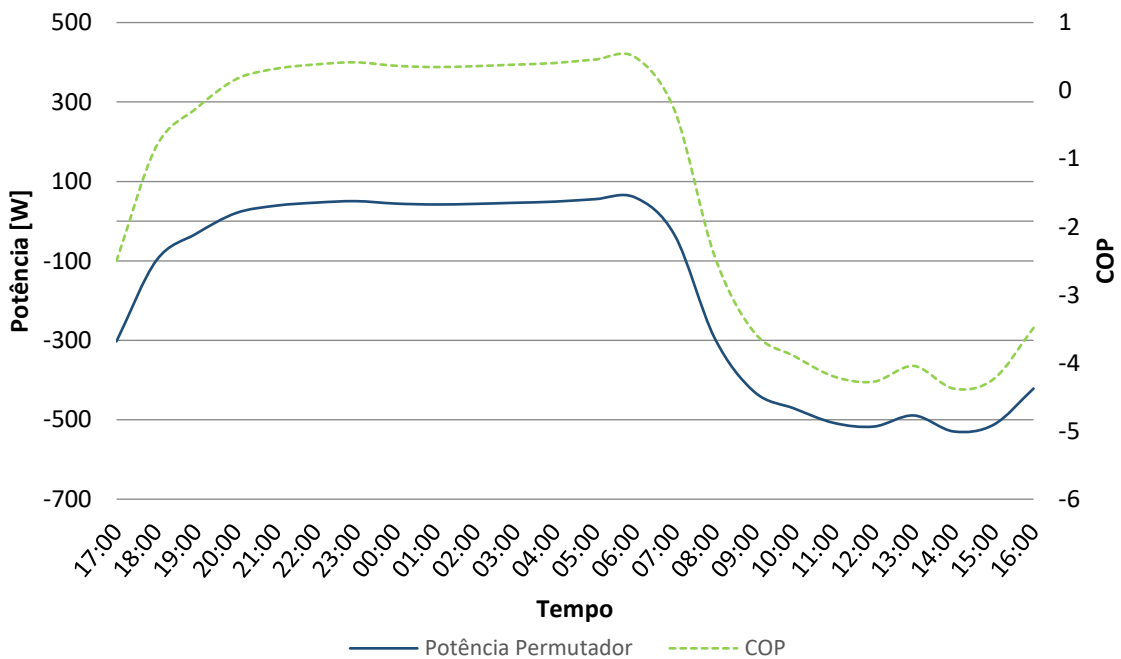


Figura 4.11 - Potência e COP do permutador de calor no ensaio A4

Após observação destes quatro gráficos, há três que são muito semelhantes e o último apresenta-se ligeiramente diferente. Como a temperatura à saída do permutador é aproximadamente constante ao longo dos ensaios, a variação da potência e COP tende a acompanhar a variação da temperatura de entrada no permutador, pois o caudal mássico, calor específico e massa específica são praticamente constantes. No ensaio A1 as linhas quase não sofrem alterações, devido ao facto da temperatura ambiente ter uma linha “suave” ao longo

do teste efetuado. Observa-se que o ensaio A3 é o que tem valores de COP mais baixos, explicando-se este facto pelo aumento da potência da ventilação, ao adicionar-se um segundo ventilador. Em praticamente todos os ensaios a potência e COP apresentam valores mais elevados para o arrefecimento, isso deve-se ao facto de o permutador receber o ar a temperaturas elevadas e entregá-lo a uma temperatura bem menor. No entanto, no aquecimento não podemos verificar isso, pois não obtivemos temperaturas ambiente muito baixas, caso isso acontecesse, presume-se que o permutador iria responder da mesma forma. De notar que no ensaio A4 se chega a registar potências de arrefecimento de cerca 500 W e COP de 4,2, sendo estes os valores de maior registo.

4.3.3. Diferença de potências consumidas pelos termoventiladores

Como referido na secção 3.5.2.2, foram realizados ensaios com o apoio de termoventiladores nas duas estufas. O principal intuito foi perceber a diferença de consumo entre a estufa de teste (apoiada pelo permutador de calor) e a estufa de controlo.

Nas figuras seguintes são apresentadas graficamente as potências consumidas pelos termoventiladores. No gráfico está representada a temperatura média na estufa de teste ($T_{\text{média}_1}$), temperatura média na estufa de controlo ($T_{\text{média}_2}$), temperatura do ambiente exterior (T_{amb}), potência do termoventilador presente na estufa de teste (Potência TV_1) e potência do termoventilador presente na estufa de controlo (Potência TV_2).

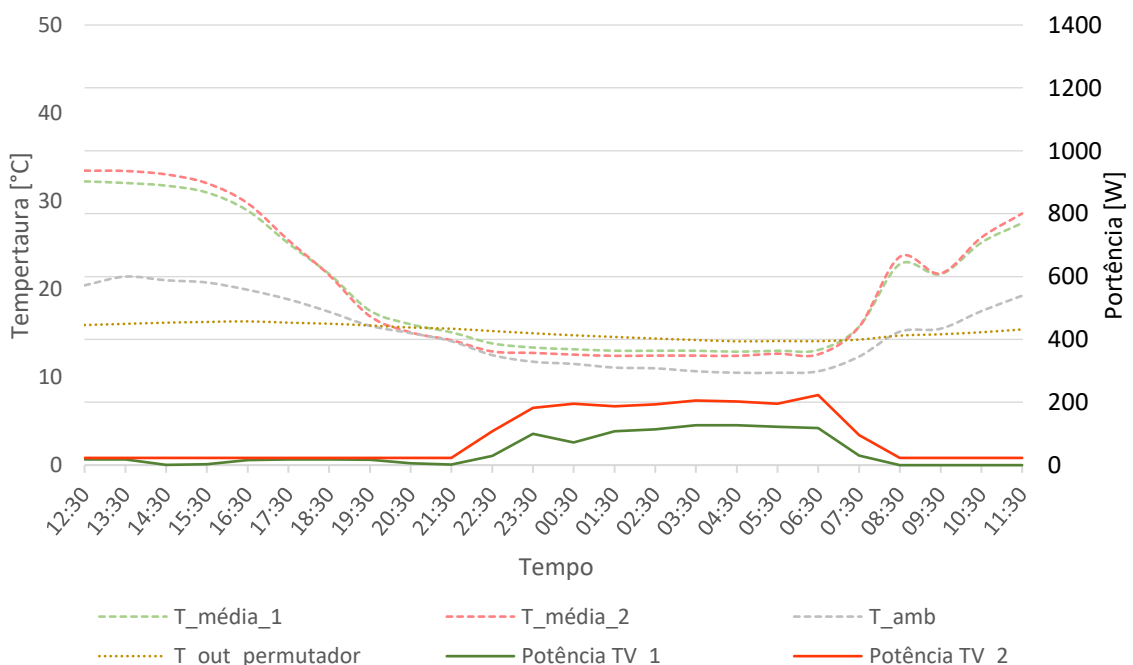


Figura 4.12 - Gráfico do consumo dos termoventiladores no ensaio B5

Como se pode verificar na tabela 3.1, presente na secção 3.5.2, o ensaio B5 foi realizado em circuito fechado e com um valor alvo de temperatura nos termoventiladores de 12 °C. Visualizando o gráfico da figura anterior relativo ao ensaio B5, depreende-se que a curva (Potência TV_1) tem valores mais elevados que a homóloga representante da estufa 2. Os termoventiladores são acionados quando a temperatura no interior das estufas baixa dos 12 °C e desligam quando a temperatura volta a subir, no nascer do sol. O consumo total nas 24h de teste do termoventilador 1 foi de 1,1 kWh e do termoventilador 2 foi de cerca 2,2 kWh. Neste caso, o consumo da estufa associada ao permutador de calor foi metade do da estufa de controlo.

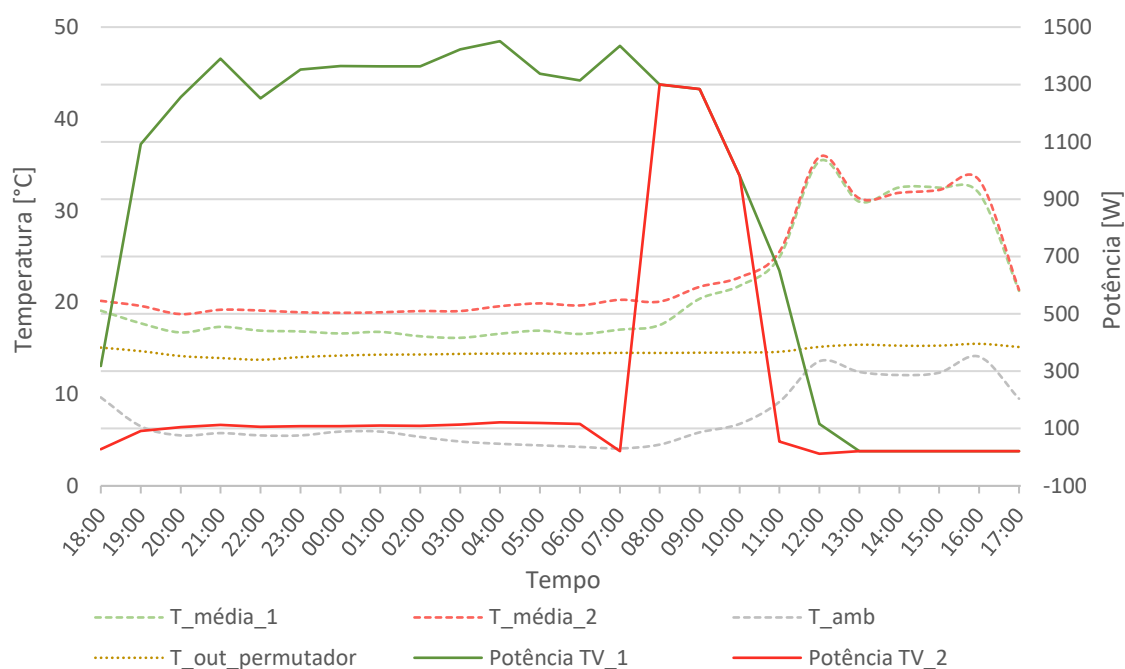


Figura 4.13 - Gráfico do consumo dos termoventiladores no ensaio B6

No ensaio B6, em relação ao ensaio anterior (B5) só se altera a temperatura alvo dos termoventiladores que foi aumentada para 20 °C. Ao apreciar o gráfico presente na figura 4.13, percebe-se que o consumo da estufa teste foi muito mais elevado que o da estufa de controlo. Isso pode ser explicado pelo facto do ar quente produzido pelo termoventilador ser enviado para o permutador de calor e conseqüentemente arrefecido, pois como sabemos pelos testes anteriores, o permutador tende a ter uma temperatura constante de cerca de 15 °C enquanto a temperatura alvo é de 20 °C. O ar arrefecido é enviado de volta para a estufa e o ciclo continua. Este mostra a capacidade de arrefecimento do permutador pois mesmo com o termoventilador na potência máxima, nunca foi possível atingir a temperatura alvo no interior da estufa. O consumo do aparelho de aquecimento na estufa 1 foi cerca de 340 % superior em relação ao da estufa 2.

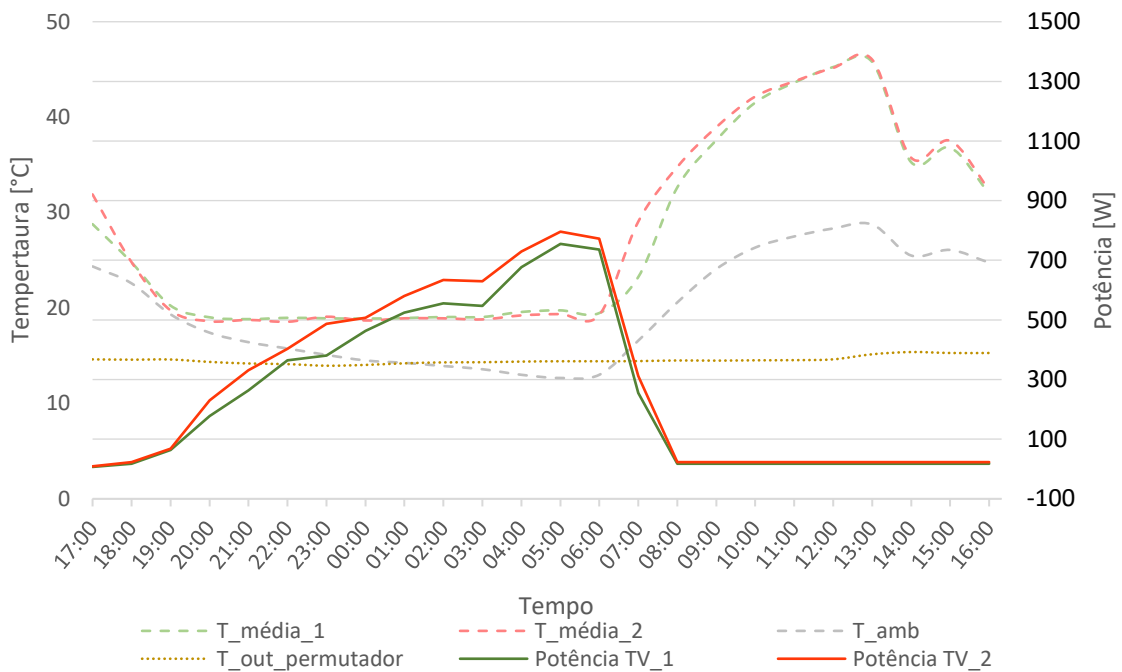


Figura 4.14 - Gráfico do consumo dos termoventiladores no ensaio B7

O ensaio B7 foi realizado em circuito aberto com temperatura alvo de 18 °C e com um ventilador adicionado na estufa de controlo. Neste teste consegue-se perceber o já anunciado em relação ao teste B5, o consumo do termoventilador presente na estufa 1 foi diminuído pela presença do permutador. Neste caso, os resultados só não foram idênticos aos do ensaio anterior pelo facto da adição do ventilador na estufa 2 (arrefece o ar interior) produzir os mesmos efeitos que o permutador de calor na estufa 1. O consumo do termoventilador presente na estufa 1 foi cerca de 13 % inferior em relação ao da estufa 2.

4.4. Nota conclusiva

Neste capítulo apresentaram-se os resultados dos dois conjuntos de testes experimentais efetuados, o estudo da monitorização da temperatura do solo a várias profundidades e em três localizações distintas e o estudo da climatização da estufa por meio de um permutador de calor ar-solo. A apresentação dos resultados obtidos foi feita através de gráficos com o objetivo de se criar uma análise mais interativa.

Relativamente ao estudo da monitorização do solo nos três locais, pode-se dizer que todos eles vão de encontro às expectativas, visualizando-se claramente os pressupostos teóricos. A diminuição da amplitude térmica com o aumento da profundidade é clara. Em todos os gráficos apresentados verifica-se uma grande diferença de temperaturas entre o ambiente e a superfície terrestre, nos meses quentes, prevendo-se então um bom potencial do solo para arrefecimento. Essas diferenças não são tão visíveis nos meses frios pela simples razão das medições de

temperatura do solo serem efetuadas durante o dia, quando a temperatura ambiente é mais elevada.

Já o estudo da climatização da estufa por meio de um permutador de calor ar-solo tem a finalidade de mostrar a capacidade que o sistema tem para climatizar uma estufa agrícola. Este foi dividido em dois grupos, os ensaios realizados unicamente com climatização a partir do permutador de calor (grupo A) e ensaios realizados com a adição de termoventiladores nas duas estufas (ensaios do grupo B).

Nos ensaios do grupo A foi apresentada a comparação de temperaturas entre as duas estufas, percebendo-se a capacidade de climatização do permutador de calor. Nos ensaios realizados, o permutador permitiu sempre o aumento ou a diminuição da temperatura da estufa de teste, caso fosse em regime de aquecimento ou arrefecimento. No ensaio com melhores resultados (A4), a estufa de teste registou, em relação à estufa de controlo, uma temperatura média de +1,5 °C em regime de aquecimento e de -3,2 °C em regime de arrefecimento.

Foi também analisada a potência do permutador de calor e COP do sistema. Em praticamente todos os ensaios, a potência e COP apresentam valores mais elevados para o arrefecimento, devendo-se ao facto do permutador receber temperaturas elevadas e entregar a uma temperatura bem menor. No entanto, no aquecimento não podemos verificar isso pois não obtivemos temperaturas muito baixas, caso isso acontecesse, prevê-se que o permutador reagisse da mesma forma. Os ensaios demonstraram a potencialidade do permutador de calor ao obter valores de potência e COP na ordem dos 500 W e 4,2, respetivamente.

Nos ensaios do grupo B foi analisada a diferença de potência consumida pelos termoventiladores presentes nas estufas. Este teste experimental tem a intenção de depreender se um aparelho de climatização presente numa estufa associada com um permutador de calor tem menor consumo energético. Dos ensaios efetuados realça-se que o conjunto (permutador+termoventilador) só é eficaz com temperaturas de alvo no termostato do termoventilador abaixo da temperatura presente no permutador. No teste com melhores resultados obtidos (B5) foi possível verificar que, com o auxílio do permutador de calor, o consumo do termoventilador presente na estufa de teste foi cerca de metade do presente na estufa de controlo.

Capítulo 5

5. Conclusão

A utilização de estufas para fins agrícolas está em expansão e a sua climatização é necessária para providenciar as condições próprias para o crescimento sustentável das plantas, em qualquer altura do ano. Aliado a isso, é cada vez mais importante encontrar estratégias para economizar energia e evitar o crescimento da poluição global. A utilização de energias renováveis na climatização de estufas pode trazer um contributo favorável na redução de emissões de gases poluentes para a atmosfera. Nesse contexto, a presente dissertação teve como objetivo o estudo da utilização de um permutador de calor ar-solo na climatização de uma estufa agrícola, aproveitando a temperatura constante da superfície terrestre.

5.1. Recapitulação

A tecnologia de efeito estufa, geralmente usada para viabilizar a produção agrícola, depende de fatores ambientais como temperatura ambiente, luz solar, humidade, etc. Atualmente o aquecimento e o arrefecimento de estufas são obtidos com o uso de vários sistemas de climatização dispendiosos e com consumo de energia excessivo. É assim importante encontrar novos sistemas de climatização, não só para a competitividade dos produtores face ao mercado global, mas também para a redução de gases poluentes para a atmosfera.

Neste contexto, analisou-se a possibilidade de utilizar o solo como fonte de calor. A superfície terrestre tem a característica de manter a temperatura aproximadamente constante durante todo o ano, devido à grande inércia térmica do solo. Com o aumento da profundidade existe uma diminuição da amplitude térmica. A profundidade suficiente, é sempre possível obter maior temperatura no solo que no ar ambiente, no inverno, e no verão em que o ar ambiente é mais quente, as temperaturas na camada superficial terrestre são mais baixas.

Deste modo, foi alvo do estudo um permutador de calor ar-solo que permite efetuar trocas de calor entre o ar e o solo. O permutador de calor utilizado no estudo está localizado na Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, enterrado a cerca de 3 m de profundidade. Apresenta um formato helicoidal, tem um comprimento total de 29 m e o tubo tem um diâmetro externo de 75 mm. Para efetuar o estudo experimental foi necessário a construção de duas estufas exatamente com o mesmo tamanho e características, localizadas uma junto à outra. A necessidade de construção das duas estufas surge para haver uma comparação entre elas, sujeitas às mesmas condições ambientais, sendo que uma foi interligada com o permutador de calor.

Foram feitos dois testes experimentais, um correspondente à monitorização da temperatura do solo em três locais distintos e o outro foi o estudo da climatização da estufa por meio de um permutador de calor ar-solo. Relativamente ao estudo da monitorização do solo nos três locais, pode-se dizer que todos eles vão de encontro às expectativas, visualizando-se claramente os pressupostos teóricos. A diminuição da amplitude térmica com o aumento da profundidade é clara.

Já o estudo da climatização da estufa por meio de um permutador de calor ar-solo tinha o objetivo de se perceber a capacidade que o sistema tem para climatizar uma estufa agrícola. Dos ensaios efetuados com os termoventiladores realça-se que o conjunto (permutador+termoventilador) só é eficaz com temperaturas de alvo no termostato do termoventilador abaixo da temperatura presente no permutador. Em determinado ensaio foi possível verificar que, com o auxílio do permutador de calor, o consumo do termoventilador presente na estufa de teste foi cerca de metade do presente na estufa de controlo.

Nos ensaios realizados só com o permutador de calor como sistema de climatização verificou-se que este permitiu sempre o aumento ou a diminuição da temperatura da estufa de teste, caso fosse em regime de aquecimento ou arrefecimento. No melhor resultado de ensaio o permutador de calor garantiu, em relação à estufa de controlo, uma temperatura média de +1,5 °C em regime de aquecimento e de -3,2 °C em regime de arrefecimento. Alcançaram-se em determinados instantes valores de potência e COP na ordem dos 500 W e 4,2, respetivamente. Face aos resultados obtidos conclui-se que o permutador de calor ar-solo pode ser visto como uma alternativa válida para a climatização de uma estufa agrícola.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Após a conclusão do presente estudo experimental e com o conhecimento adquirido na sua realização são apresentadas algumas sugestões para trabalhos a desenvolver no futuro para o melhoramento deste assunto.

Uma medida possível de otimização do sistema é a instalação de uma sonda de temperatura na estufa, ligada a um termostato, que permita que o ventilador do permutador seja desligado após certos valores de temperatura serem alcançados.

Propõe-se também o desenvolvimento de um sistema que controle automaticamente a entrada de ar no permutador, podendo alternar automaticamente entre circuito aberto e fechado, consoante os dados lidos no interior da estufa.

Sugere-se também o estudo da climatização da estufa agrícola por meio do permutador de calor, combinado com o sistema de sombreamento, evitando assim a entrada da radiação solar e conseqüentemente aquecimento excessivo no interior da estufa.

Por último e tendo como objetivo a otimização do teste experimental com os termoventiladores, propõe-se utilizar o permutador de calor ar-solo como pré-aquecedor de ar do termoventilador e analisar o consumo dos termoventiladores das duas estufas, sendo que o ar de um deles é pré-aquecido.

Referências bibliográficas

- [1] “GECO 2019.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/geco/>. [Accessed: 03-May-2019].
- [2] “Heating and Cooling | Energy.” [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling>. [Accessed: 06-May-2019].
- [3] M. Djevic and A. Dimitrijevic, “Greenhouse Energy Consumption and Energy Efficiency,” *Energy*, no. 3.
- [4] J. M. Costa and E. Heuvelink, *Greenhouse Horticulture in China: situation and prospects*, no. November 2003. 2004.
- [5] M. Canakci, N. Y. Emekli, S. Bilgin, and N. Caglayan, “Heating requirement and its costs in greenhouse structures : A case study for Mediterranean region of Turkey,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 483–490, 2013.
- [6] H. H. Ozturk and H. K. Kucukerdem, “Determination Of Heating Requirements And Energy Consumption Of Greenhouses In Adana Region Of Turkey,” *Agrolife Sci. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 157–160, 2016.
- [7] N. Silva, “Oeste antecipa colheita de tomate com aquecimento,” *A revista da Associação Portuguesa de Horticultura*, Nov-2015.
- [8] J. W. Lund and T. L. Boyd, “Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review,” *Geothermics*, vol. 60, pp. 66–93, 2016.
- [9] “Campo de Dalías, as estufas de Almeria.” [Online]. Available: <https://www.magnusmundi.com/campo-de-dalias-as-estufas-de-almeria/>. [Accessed: 15-May-2019].
- [10] B. von Elsner *et al.*, “Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries: Part I, Design Requirements,” *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 75, no. 1, pp. 1–16, 2000.
- [11] M. Bavec, M. Robačar, D. Stajniko, T. Vukmanić, and F. Bavec, “Structures: design, technology and climate control,” *Good Agric. Pract. Greenh. Veg. Prod. South East Eur. countries. Princ. sustainable Intensif. Smallhold. farms*, pp. 29–51, 2017.
- [12] N. Sabir and B. Singh, “Protected cultivation of vegetables in global arena: A review,” *Indian J. Agric. Sci.*, vol. 83, no. 2, pp. 123–135, 2013.
- [13] B. Von Elsner *et al.*, “Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries, part II: Typical designs,” *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 75, no. 2, pp. 111–126, 2000.
- [14] “Metallic Structures - Campoeste.” [Online]. Available: <http://www.campoeste.pt/en/metallic-structures/>. [Accessed: 15-May-2019].
- [15] J. N. Walker and G. A. Duncan, “Greenhouse location and orientation,” p. 131, 2014.
- [16] P. Basiaux, J. Deltour, and A. Nisen, “Effect of diffusion properties of greenhouse covers on light balance in the shelters,” *Agric. Meteorol.*, vol. 11, no. C, pp. 357–372, 1973.

- [17] M. J. I. Pere Muñoz, Assumpció Antón, “Tendencias en la construcción de invernaderos: normas cen y un sistema de control ambiental y posibilidades de mecanización de operaciones de cultivo y riego,” *Poult. Sci.*, 2013.
- [18] V. P. Sethi and S. K. Sharma, “Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications,” *Sol. Energy*, vol. 82, no. 9, pp. 832–859, 2008.
- [19] A. M. Druma, “Dynamic Climate Model of a Greenhouse,” p. 35, 1998.
- [20] J. Nijskens, J. Deltour, S. Coutisse, and A. Nisen, “Radiation transfer through covering materials, solar and thermal screens of greenhouses,” *Agric. For. Meteorol.*, vol. 35, no. 1–4, pp. 229–242, 1985.
- [21] A. Rasheed, J. W. Lee, and H. W. Lee, “Development and optimization of a building energy simulation model to study the effect of greenhouse design parameters,” *Energies*, vol. 11, no. 8, 2018.
- [22] S. K. Chou, K. J. Chua, J. C. Ho, and C. L. Ooi, “On the study of an energy-efficient greenhouse for heating, cooling and dehumidification applications,” vol. 77, pp. 355–373, 2004.
- [23] V. P. Sethi and S. K. Sharma, “Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications,” vol. 81, pp. 1447–1459, 2007.
- [24] J. Chau, T. Sowlati, S. Sokhansanj, F. Preto, S. Melin, and X. Bi, “Techno-economic analysis of wood biomass boilers for the greenhouse industry,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 3, pp. 364–371, 2009.
- [25] “Advantages & Disadvantages of Heat Pumps (2019) | GreenMatch,” 2018. [Online]. Available: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/08/heat-pumps-7-advantages-and-disadvantages>. [Accessed: 17-May-2019].
- [26] M. Grafiadellis, “DEVELOPMENT OF A PASSIVE SOLAR SYSTEM FOR HEATING GREENHOUSES.pdf.” pp. 245–252, 1986.
- [27] G. Boyle, *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. 2004.
- [28] Pedro Reis, “Energia Geotérmica e o calor da terra,” 2016. [Online]. Available: <https://www.portal-energia.com/energia-geotermica-calor-da-terra/>. [Accessed: 17-May-2019].
- [29] D. Moya, C. Aldás, and P. Kaparaju, “Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 94, no. June, pp. 889–901, 2018.
- [30] G. C. Bakos, D. Fidanidis, and N. F. Tsagas, “Greenhouse heating using geothermal energy,” *Geothermics*, vol. 28, no. 6, pp. 759–765, 1999.
- [31] M. Santamouris, C. Balaras, E. Dascalaki, and M. Vallindras, “Passive solar agricultural greenhouses: A worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes PASSIVE SOLAR AGRICULTURAL GREENHOUSES ;,” no. November 2017, 1994.
- [32] R. D. Singh and G. N. Tiwari, “Thermal heating of controlled environment greenhouse: a transient analysis,” vol. 41, pp. 505–522, 2000.

- [33] A. Kürklü, S. Bilgin, and B. Ozkan, "A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse," vol. 28, pp. 683–697, 2003.
- [34] V. P. Sethi and S. K. Sharma, "Experimental and economic study of a greenhouse thermal control system using aquifer water," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 1, pp. 306–319, 2007.
- [35] K. S. Kumar, K. N. Tiwari, and M. K. Jha, "Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review," *Energy Build.*, vol. 41, no. 12, pp. 1269–1275, 2009.
- [36] A. Baille, C. Kittas, and N. Katsoulas, "Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 107, no. 4, pp. 293–306, 2001.
- [37] H. Toida, T. Kozai, K. Ohyama, and Handarto, "Enhancing fog evaporation rate using an upward air stream to improve greenhouse cooling performance," *Biosyst. Eng.*, vol. 93, no. 2, pp. 205–211, 2006.
- [38] P. J. Bernier H, Raghavan G, "Evaluation of a soil heat exchanger-storage system for a greenhouse . Part I : System performance," vol. 33, no. 1, pp. 93–98, 1991.
- [39] V. P. Sethi and S. K. Sharma, "Thermal modeling of a greenhouse integrated to an aquifer coupled cavity flow heat exchanger system," vol. 81, pp. 723–741, 2007.
- [40] R. Misra, V. Bansal, G. Das Agarwal, J. Mathur, and T. Aseri, "Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger," *Energy Build.*, vol. 49, pp. 531–535, 2012.
- [41] W. Report, N. H. Batjes, and E. M. Bridges, *a Review of Soil Factors and Processes That Control Fluxes of Heat , Moisture and Greenhouse Gases*. 1992.
- [42] K. Bryś, T. Bryś, M. A. Sayegh, and H. Ojrzyńska, "Subsurface shallow depth soil layers thermal potential for ground heat pumps in Poland," *Energy Build.*, vol. 165, pp. 64–75, 2018.
- [43] S. Zhou, W. Cui, J. Tao, and Q. Peng, "Study on ground temperature response of multilayer stratums under operation of ground-source heat pump," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 101, pp. 173–182, 2016.
- [44] G. Radioti, K. Sartor, R. Charlier, P. Dewallef, and F. Nguyen, "Effect of undisturbed ground temperature on the design of closed-loop geothermal systems: A case study in a semi-urban environment," *Appl. Energy*, vol. 200, pp. 89–105, 2017.
- [45] A. Murat, A. Sisman, A. Gultekin, and B. Dehghan, "An experimental performance comparison between different shallow ground heat exchangers," *World Geotherm. Congr. 2015*, no. April, pp. 19–25, 2015.
- [46] B. Usowicz, M. I. Łukowski, C. Rüdiger, J. P. Walker, and W. Marczewski, "Thermal properties of soil in the Murrumbidgee River Catchment (Australia)," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 115, pp. 604–614, 2017.
- [47] M. Lehnert, M. Vysoudil, and P. Kladio, "Semi-stationary measurement as a tool to refine understanding of the soil temperature spatial variability," *Int. Agrophysics*, vol. 29, no. 4, pp. 449–457, 2015.

- [48] M. M. Al-Kaisi, R. Lal, K. R. Olson, and B. Lowery, "Fundamentals and Functions of Soil Environment," in *Soil Health and Intensification of Agroecosystems*, 2017, pp. 1–23.
- [49] S. Nikoosokhan, H. Nowamooz, and C. Chazallon, "Effect of dry density, soil texture and time-spatial variable water content on the soil thermal conductivity," *Geomech. Geoengin.*, vol. 11, no. 2, pp. 149–158, 2016.
- [50] C. Pereira, "Coeficiente de Condutibilidade Térmica - Futureng." [Online]. Available: <http://www.futureng.pt/coeficiente-de-condutibilidade-termica>. [Accessed: 22-May-2019].
- [51] O. T. Farouki, "Thermal properties of soils," pp. 110–120, 1982.
- [52] G. McCorry, M., Jones, *GEOTRAINET TRAINING MANUAL FOR DESIGNERS OF SHALLOW GEOTHERMAL SYSTEMS*. Geo-Education for a sustainable geothermal heating and cooling market, 2011.
- [53] A. Calado, "Monitorização da temperatura do solo . Desenvolvimento e estudo experimental de um permutador de calor ar-solo," 2016.
- [54] S. Menhoudj, A. M. Mokhtari, M. H. Benzaama, C. Maalouf, M. Lachi, and M. Makhlouf, "Study of the energy performance of an earth—Air heat exchanger for refreshing buildings in Algeria," *Energy Build.*, vol. 158, pp. 1602–1612, 2018.
- [55] L. Ozgener, "A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4483–4490, 2011.
- [56] S. Kumar, M. Pandey, and V. Nath, "Ground coupled heat exchangers : A review and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 83–92, 2015.
- [57] N. Bordoloi, A. Sharma, H. Nautiyal, and V. Goel, "An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 89, no. June 2017, pp. 261–280, 2018.
- [58] B. Sanner, "GEOTHERMAL HEAT PUMPS TECHNOLOGIES," pp. 100–108, 2004.
- [59] S. Kumar Soni, M. Pandey, and V. Nath, "Energy metrics of a hybrid earth air heat exchanger system for summer cooling requirements," *Energy Build.*, vol. 129, pp. 1–8, 2016.
- [60] S. K. Georgios Florides, "Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications," *Hepato-Gastro*, vol. 32, no. 15, pp. 2461–2478, 2007.
- [61] P. Hollmuller and B. Lachal, "Cooling and preheating with buried pipe systems: Monitoring, simulation and economic aspects," *Energy Build.*, vol. 33, no. 5, pp. 509–518, 2001.
- [62] R. R. Dasare and S. K. Saha, "Numerical study of horizontal ground heat exchanger for high energy demand applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 85, pp. 252–263, 2015.
- [63] H. Yuping, J. Shengqin, C. Qiao, and C. Bianco, "Cooling System of Outdoor Cabinet using Underground Heat Pipe," pp. 2–6, 2008.
- [64] M. De Paepe and A. Janssens, "Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers," vol. 35, pp. 389–397, 2003.
- [65] M. Santamouris, G. Mihalakakou, C. Balaras, and A. A. Argiriou, "Use of buried pipes for energy conservation in cooling of agricultural greenhouses," no. May 2016, 1995.

- [66] M. Khabbaz, B. Benhamou, K. Limam, P. Hollmuller, H. Hamdi, and A. Bennouna, "Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate," *Energy Build.*, vol. 125, pp. 109–121, 2016.
- [67] M. Bojic, "Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building," vol. 22, no. 12, pp. 1151–1158, 1997.
- [68] A. A. Serageldin, A. K. Abdelrahman, and S. Ookawara, "Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions : Experimental results , mathematical model , and Computational Fluid Dynamics simulation," *Energy Convers. Manag.*, vol. 122, pp. 25–38, 2016.
- [69] A. Mathur, A. K. Surana, P. Verma, S. Mathur, G. D. Agrawal, and J. Mathur, "Investigation of soil thermal saturation and recovery under intermittent and continuous operation of EATHE," *Energy Build.*, vol. 109, pp. 291–303, 2015.
- [70] V. P. Kabashnikov, L. N. Danilevskii, V. P. Nekrasov, and I. P. Vityaz, "Analytical and numerical investigation of the characteristics of a soil heat exchanger for ventilation systems," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 45, no. 11, pp. 2407–2418, 2002.
- [71] D. Belatrache, "Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates," vol. 2, 2016.
- [72] O. Ozgener and L. Ozgener, "Exergetic assessment of EAHEs for building heating in Turkey: A greenhouse case study," *Energy Policy*, vol. 38, no. 9, pp. 5141–5150, 2010.
- [73] S. Mongkon, S. Thepa, P. Namprakai, and N. Pratinthong, "Cooling performance and condensation evaluation of horizontal earth tube system for the tropical greenhouse," *Energy Build.*, vol. 66, pp. 104–111, 2013.
- [74] V. M. Santamouris M, Argiriou A, "Design and Operation of a Low Energy Consumption Passive Solar," vol. 52, no. 5, pp. 371–378, 1994.
- [75] G. Sharan and H. Prakash, "Performance of Greenhouse Coupled to Earth-Tube-Heat-Exchanger in Closed-Loop Mode," pp. 1–11, 2004.
- [76] A. Trombe and L. Serres, "Air-earth exchanger study in real site experimentation and simulation," vol. 21, pp. 155–162, 1994.
- [77] "coolhouse-project." [Online]. Available: <http://www.almaverde.com/en/villa-designs/coolhouse-project.html>.
- [78] H. Gonçalves and P. Cabrito, "Edifício Solar XXI : Um edifício energeticamente eficiente em Portugal," *Ineti*, p. 6, 2005.
- [79] J. R. Sharan Girja, Sahu R.K, "Air-cooling and Heating System for Tiger in Zoo using Earth Tube Heat Exchanger," 2002.
- [80] G. Sharan, "Development and some applications of earth tube heat exchanger in Gujarat," *Nanubhai Amin Meml. Lect. Electr. Res. Dev. Assoc. Vadodara*, 2004.

- [81] "Multi-Channel Datalogging Temperature Meter PCE-T 1200 | PCE Instruments." [Online]. Available: https://www.pce-instruments.com/english/measuring-instruments/test-meters/temperature-meter-pce-instruments-multi-channel-datalogging-temperature-meter-pce-t-1200-det_1224896.htm. [Accessed: 08-Jun-2019].
- [82] "Temperature USB Display Data Logger - Lascar." [Online]. Available: <https://www.lascarelectronics.com/easylog-data-logger-el-usb-1-lcd/>. [Accessed: 08-Jun-2019].
- [83] "Wireless Energy Monitor E2 Classic with USB port | Efergy." [Online]. Available: <https://efergy.com/electricity-monitors/wireless-energy-monitor-e2-classic/>. [Accessed: 08-Jun-2019].
- [84] "testo 416 - Anemómetro de molinete." [Online]. Available: <https://www.testo.com/pt-PT/testo-416/p/0560-4160>. [Accessed: 08-Jun-2019].
- [85] "S&P - Exaustor TD-800/200 - S&P." [Online]. Available: <https://www.mhr.pt/143261-s-p-exaustor-td-800-200-0000521130400.html>. [Accessed: 08-Jun-2019].