



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

Otimização do arrefecimento de um armário de telecomunicações através de um permutador de calor ar-sole

Daniel da Silva Alves

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

Orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires
Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva

Covilhã, outubro de 2018

Agradecimentos

O presente trabalho marca o fim de uma importante etapa da minha vida e não ficaria completo sem agradecer a todos os que me ajudaram a concretizá-lo.

Em primeiro, quero agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Luís Carlos Pires e o Professor Doutor Pedro Nuno Dinho da Silva, pela sua disponibilidade, empenho, dedicação, ajuda e apoio na concretização deste trabalho, sem a qual este não seria possível.

Agradeço igualmente ao Sr. João Correia, técnico do Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor da Universidade da Beira Interior, e ao Sr. Luciana Rato, técnico do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, pela sua disponibilidade e auxílio prestado durante a fase de implementação do trabalho.

A todos os meus amigos e colegas de curso que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a concretização deste projeto.

À minha família, em especial aos meus pais, Albino Alves e Anabela Alves, e irmão Afonso Alves, pelo apoio constante, pelos incentivos ao longo da realização deste trabalho, pela confiança e, sobretudo, pela paciência.

À minha namorada Susana Pais, por todo o apoio e motivação dado, pelo companheirismo, paciência, e incentivo, por tudo.

A todos, muito obrigado!

Resumo

A área das redes de comunicação e telecomunicações é uma das mais importantes da atualidade no contexto das novas tecnologias. As telecomunicações têm ganho uma extrema importância e relevância na vida da sociedade em geral, forçando a aquisição, por parte das empresas fornecedoras destes serviços, de mais equipamentos e dispositivos que assegurem a pronta prestação desses serviços, com a adequada cobertura geográfica. Entre os dispositivos que constituem as redes de comunicação móveis, encontram-se os armários onde são alojados os equipamentos de rádio e o restante equipamento que permite comunicar com as estações móveis (telemóveis). Estes armários apresentam características construtivas específicas e são dotados de um sistema de arrefecimento que deve garantir uma temperatura interna de funcionamento inferior a 55 °C. Os sistemas de arrefecimento podem consumir de 30% a 50% da eletricidade total da instalação, devido ao facto de existir a necessidade de arrefecimento quase todo o ano.

Posto isto, o presente estudo avalia um método passivo para o arrefecimento de um armário de telecomunicações, baseado na utilização de um permutador de calor ar-solo. De modo a simular a carga térmica dissipada pelos equipamentos de telecomunicações, foi instalada uma resistência elétrica no interior do armário de telecomunicações, que possibilitou estudar a variação da temperatura interna do armário através da realização de vários ensaios com diferentes cargas térmicas dissipadas. Posteriormente, foi analisado o desempenho do sistema de arrefecimento ensaiado, tendo como base a monitorização da temperatura no interior do armário e ao longo do permutador. Os resultados deste estudo revelam que a utilização de um permutador de calor ar-solo possui capacidades de melhorar a temperatura interna de funcionamento do armário comparativamente aos sistemas de ventilação forçada. Em simultâneo com este trabalho foi realizado outro estudo, que se baseou em analisar as variações da temperatura do solo em três locais da cidade da Covilhã, permitindo assim, conhecer o padrão da temperatura apresentado pelo solo, metro a metro, até aos 5 metros de profundidade. Os dados obtidos deste estudo, mostram que a amplitude térmica tende a diminuir com o aumento da profundidade e que a temperatura a qualquer profundidade tende a permanecer constante ao longo de 24 horas.

Palavras-chave

Arrefecimentos passivo, Arrefecimento de um armário de telecomunicações, Permutador de calor ar-solo, Monitorização da temperatura.

Abstract

The area of telecommunications and communication networks is one of the most important in the current context of new technologies. Telecommunications have gained an extreme importance and relevance in the life of society, forcing companies that provide these services to increasingly acquire equipment and devices to ensure the prompt provision of these services with the appropriate geographic coverage.

Among the devices that compose the mobile communication networks are the cabinets where the radio equipment is housed and other equipment that allows communication with mobile stations (mobile phones). These cabinets have specific constructional characteristics and are provided with a cooling system which must ensure an internal operating temperature of less than 55°C. In order to assure the interior's cooling of these cabinets one can resort having diverse cooling systems. These can consume 30% to 50% of the total electricity from the facility due to need for cooling almost all year round.

Therefore, the present study evaluates a passive method for the cooling of a telecommunications cabinet based on an earth to air heat exchanger. In order to simulate the thermal load dissipated by the telecommunications equipment, an electrical resistance was installed inside the cabinet, which allowed to study the cabinet's internal temperature variation by conducting several tests with different dissipated thermal loads. Subsequently, the tested cooling system's performance was analysed based on the temperature monitoring inside the cabinet and along the exchanger. The results of this study reveal that the use of an earth to air heat exchanger has the capability to improve the cabinet's internal operation temperature compared to forced ventilation systems. Concurrently, another study was carried out, which was based on the analysis of soil temperature variations on three locations in the city of Covilhã, allowing to know the soil temperature pattern, meter by meter, up to a depth of 5 meters. The data acquired shows that the thermal amplitude tends to decrease with increasing depth and that the temperature at any depth tends to remain constant over 24 hours.

Keywords

Passive cooling, Cooling of a telecommunications cabinet, Earth to air heat exchanger, Temperature monitoring.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xix
Lista de Símbolos	xxi
Símbolos Gregos.....	xxi
Índice Inferiores.....	xxi
Lista de Acrónimos.....	xxii
1. Introdução.....	1
1.1. Perspetiva Geral	1
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	6
1.3. Revisão bibliográfica	8
1.3.1. Trabalhos relacionados com a aplicação de permutadores de calor ar-solo.....	8
1.3.2. Aplicação de permutadores de calor nos armários de telecomunicações	12
1.4. Objetivos e contribuição da presente dissertação.....	14
2. Gestão da temperatura num armário de telecomunicações	15
2.1. Influência da temperatura nos equipamentos eletrónicos	15
2.2. Métodos e sistemas de arrefecimento de armários de telecomunicações.....	22
2.3. Nota conclusiva	29
3. Climatização por meio de permutadores de calor ar-solo	31
3.1. Solo enquanto fonte térmica	32
3.1.1. Regime térmico	32

3.1.2.	Propriedades térmicas do solo	34
3.2.	Permutadores de calor ar-solo	40
3.2.1.	Princípio de funcionamento e tipos de geometria dos permutadores de calor ar-solo	40
3.2.2.	Parâmetros e fatores influentes no desempenho de permutadores de calor ar-solo	44
3.2.3.	Análise energética.....	47
3.3.	Aplicações de permutadores de calor	49
3.3.1.	Climatização de uma estufa agrícola	49
3.3.2.	Arrefecimento de um armário de telecomunicação típico FTTC	52
3.3.3.	Aplicações em Portugal - Edifício solar XXI	53
3.4.	Nota conclusiva	55
4.	Materiais e métodos	57
4.1.	O armário de telecomunicações	57
4.1.1.	Características do armário.....	57
4.1.2.	Equipamentos de telecomunicações no interior do armário.....	59
4.1.3.	Sistema de arrefecimento original	61
4.2.	Permutador de calor ar-solo.....	63
4.2.1.	Localização geográfica	63
4.2.2.	Descrição e especificações do permutador	63
4.3.	Equipamentos auxiliares	65
4.3.1.	Medição da temperatura	65
4.3.2.	Medição da velocidade	66
4.3.3.	Sistema de ventilação	67

4.3.4. Sistema de aquecimento	70
4.3.5. Sistemas de alimentação	72
4.4. Estudos experimentais	74
4.4.1. Monitorização da temperatura do solo	74
4.4.2. Ensaio com o armário de telecomunicações e o permutador de calor ar-solo	77
4.4.2.1. Ensaio do arrefecimento do armário apenas com o ar proveniente do permutador de calor ar-solo - Circuito fechado	80
4.4.2.2. Ensaio com o sistema de arrefecimento original do armário (ventilação forçada do ar exterior).....	84
4.5. Nota conclusiva	85
5. Análise e discussão dos resultados	87
5.1. Monitorização da temperatura do solo	87
5.1.1. Monitorização semanal da temperatura do solo nos três locais.....	87
5.1.2. Monitorização da temperatura do solo ao longo de 24 horas	91
5.2. Arrefecimento do armário de telecomunicações por meio do permutador de calor ar-solo	92
5.2.1. Temperatura no armário e no permutador de calor	92
5.2.2. Potência de arrefecimento	97
5.2.3. Diferença de temperatura entre o ambiente e o interior do armário	99
5.3. Nota conclusiva	101
6. Conclusão.....	103
6.1. Recapitulação	103
6.2. Sugestão para trabalho futuro	105
Referências bibliográficas	107

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Subscrições de serviços móveis por milhares de milhões de subscritores, no período de 2013-2017 e com previsão até 2023 (Ericsson, 2018).	3
Figura 1.2 - Tráfego móvel mundial por tipo de utilização, desde o primeiro trimestre (Q1) de 2013 até ao primeiro trimestre (Q1) de 2018 (Ericsson, 2018).	4
Figura 1.3- Sistema de comunicação móvel (Azevedo).....	4
Figura 1.4 - Consumo de energia de elementos do sistema de comunicação (Ahmed, 2018). ...	8
Figura 1.5 - Permutador de tubos e de placas (Zukowski, 2017).	9
Figura 1.6 - Montagem do sistema híbrido, permutador ar-solo e AC tradicional (Soni, 2016).11	
Figura 2.1 - Fatores que levam à diminuição da durabilidade e à ocorrência de avarias em componentes eletrónicos (adaptado de Shen e Mahalle, 2013).	16
Figura 2.2 - Relação entre o controlo da temperatura e o modo de funcionamento dos equipamentos de telecomunicações (ASHRAE, 2012).	17
Figura 2.3 - Fontes de calor numa estação base de telecomunicações (EBT) (Tu, 2011).	19
Figura 2.4 - Fontes de calor num armário exterior de telecomunicações.	19
Figura 2.5 - Representação dos três modos de transmissão de calor.	21
Figura 2.6 - Comportamento físico de um material de mudança de fase (Mejdzade, 2017). .	24
Figura 2.7 - o de funcionamento e instalação de um termossifão bifásico de circuito fechado para arrefecimento de um armário de telecomunicações (Samba, 2013).	25
Figura 2.8 - Permutador de calor ar-solo para arrefecimento de um armário de telecomunicações (Yuping, 2008).	26
Figura 2.9 - Permutador água-solo para arrefecimento de um armário de telecomunicações (Hong, 2009).	26
Figura 2.10 - Esquema de funcionamento de um sistema de ar condicionado e os diversos componentes (Purcell, 2012).	27

Figura 2.11 - Unidade de ar condicionado implementado num armário de telecomunicações (Purcell, 2012).	28
Figura 2.12 - Modo de funcionamento de um sistema de arrefecimento direto pela passagem de ar (DAC) (Purcell,2012).	29
Figura 3.1 - Variação da temperatura do solo em relação à profundidade: (a) região de Chongqing, China (2013). (b) região de Maslak, Turquia (2011-2012) (Adaptada de Zhou, 2016 e Aydin, 2015), respetivamente.	33
Figura 3.2 - Esquema ilustrativo de um permutador de calor ar-solo em circuito aberto (Adaptado de Kausahal, 2015).	42
Figura 3.3 - Esquema ilustrativo de um permutador de calor ar-solo em circuito fechado (Adaptado de Kausahal, 2015).	42
Figura 3.4 - Esquemas das diferentes configurações dos permutadores de calor ar-solo, em circuito fechado horizontais: a) em série; b) em paralelo; c) em andares; d) simples (Adaptado de Sanner, 2004).	43
Figura 3.5 - Esquema da configuração dos permutadores de calor ar-solo, em circuito fechado vertical. (Adaptado de Sanner, 2004).	44
Figura 3.6 - Princípio de funcionamento do permutador de calor ar-solo para arrefecimento de uma estufa (Adaptada de Mongkon, 2013).	50
Figura 3.7 - Vista exterior da estufa e implementação do permutador de calor ar solo (Mongkon et al., 2013).	51
Figura 3.8 - Diferença de temperatura no interior da estufa (Mongkon et al., 2013).	52
Figura 3.9 - Armário de telecomunicação típico FTTC e o respetivo permutador de calor ar-solo (o permutador encontra-se, ainda, por enterrar) (Yuping et al.,2008).	53
Figura 3.10 - Esquematização do princípio de funcionamento do permutador de calor ar-solo do edifício Solar XXI (Adaptado INETI, 2005).	54
Figura 3.11 - Pormenor da instalação das tubagens (Adaptado de INETI, 2005).	54
Figura 4.1 - Armário de telecomunicações ABE_V2. 1) Cobertura do armário; 2) Armário de telecomunicações; 3) Pedestal (chão falso).	59

Figura 4.2 - Armário ABE_V2, equipado com os equipamentos referidos e em pleno funcionamento (Delgado, 2016).	61
Figura 4.3 - a) Localização dos ventiladores instalados no armário; b) Ventiladores, modelo 4318 da EBM PAST.	62
Figura 4.4 - Localização geográfica do permutador de calor ar-solo empregue no presente estudo.....	63
Figura 4.5 -Esboço ilustrativo do permutador de calor ar-solo (Calado, 2016).	64
Figura 4.6 - Data logger PCE-T 1200 da PCE <i>instruments</i>	65
Figura 4.7 - Anemómetro de hélice, modelo Testo 416.....	66
Figura 4.8 - Posicionamento do anemómetro com o respetivo suporte (Calado, 2016).....	67
Figura 4.9 - Ventilador TD-800/200 da marca S&P.	68
Figura 4.10 - Esquematização dos parâmetros do dimensionamento das reduções.....	69
Figura 4.11 - Dimensões das peças, em milímetros [mm].	69
Figura 4.12 - Ventilador e respetivos acessórios instalados. a) ventilador e tubo de retorno com isolamento térmico; b) ventilador sem isolamento térmico e tubo de retorno com isolamento térmico.	70
Figura 4.13 - Pormenor dos furos e dos ventiladores instalados na caixa dissipadora de calor.	71
Figura 4.14 - Resistência térmica existente no interior da caixa dissipadora de calor.....	71
Figura 4.15 - Multímetro digital Fluke, modelo 177.	72
Figura 4.16 - Fonte de alimentação AC variável, modelo SV-8A.	73
Figura 4.17 - Fonte de alimentação dos ventiladores da caixa dissipadora de calor.	73
Figura 4.18 - Transformador AC/DC 48 V.	74
Figura 4.19 - Localização geográfica das sondas A e B.	76
Figura 4.20 - Localização geográfica da sonda C.....	76

Figura 4.21 - Esquema representativo da construção das sondas (Calado, 2016).	77
Figura 4.22 - Esquerda: Localização dos termopares presentes no interior do armário; Direita: Pormenor das localizações do termopar 3.	79
Figura 4.23 - Localização dos termopares ao longo do permutador (Calado, 2016).	80
Figura 4.24 - Caixa metálica que abriga alguns dos equipamentos auxiliares.	80
Figura 4.25 - Vedações realizadas na ligação entre a saída de ar do permutador de calor ar-solo (esquerda) e a entrada de ar no armário (direita).	82
Figura 4.26 - Ligação entre a saída de ar do armário e o tubo de retorno para o permutador.	82
Figura 4.27 - Zona do pedestal isolada.	82
Figura 4.28 - Ranhuras da cobertura vedadas.	83
Figura 4.29 - Esquema do fluxo de ar no sistema ensaiado.	83
Figura 4.30 - Esquema do fluxo de ar no sistema de arrefecimento original do armário (Adaptado de Diogo, 2017).	85
Figura 5.1 - Variação da temperatura do solo em relação à profundidade, de setembro de 2017 até setembro de 2018, no local A - “Reitoria Baixo”.	88
Figura 5.2 - Variação da temperatura do solo em relação à profundidade, de setembro de 2017 até setembro de 2018, no local B - “Reitoria Cima”.	89
Figura 5.3 - Variação da temperatura do solo em relação à profundidade, de setembro de 2017 até setembro de 2018, no local C - “Engenharias”.	90
Figura 5.4 - Variação da temperatura do solo e da temperatura ambiente, de 20 de junho de 2018 a 21 de junho de 2018, no local C - “Engenharias”.	91
Figura 5.5 - Variação da temperatura do solo e da temperatura ambiente, de 21 de junho de 2018 a 22 de junho de 2018, no local A - “Reitoria Baixo”.	92
Figura 5.6 - Variação da temperatura do solo e da temperatura ambiente, de 22 de junho de 2018 a 23 de junho de 2018, no local A - “Reitoria Cima”.	92
Figura 5.7 - Evolução da temperatura no armário e no permutador de calor para as diferentes cargas térmicas e para um caudal volumétrico de 62,0 m ³ /h.	93

Figura 5.8 - Evolução da temperatura no armário e no permutador de calor para as diferentes cargas térmicas e para um caudal volumétrico de 55,7 m ³ /h.	94
Figura 5.9 - Evolução da temperatura no armário e da temperatura ambiente para carga térmica de 300 W, utilizando o sistema de arrefecimento original do armário.....	96
Figura 5.10 - Evolução da temperatura no armário, no permutador de calor e da temperatura ambiente para os ensaios com carga térmica de 300W.	96
Figura 5.11 - Potência de arrefecimento e COP da instalação nos ensaios com carga térmica 150 W (Q1 e COP1 são referentes ao ensaio com caudal 62,0 m ³ /h e Q2 e COP2 são referentes ao ensaio com caudal de 55,7 m ³ /h).	97
Figura 5.12 - Potência de arrefecimento e COP da instalação nos ensaios com carga térmica 300 W (Q1 e COP1 são referentes ao ensaio com caudal 62,0 m ³ /h e Q2 e COP2 são referentes ao ensaio com caudal de 55,7 m ³ /h).	98
Figura 5.13 - Potência de arrefecimento e COP da instalação nos ensaios com carga térmica 450 W (Q1 e COP1 são referentes ao ensaio com caudal 62,0 m ³ /h e Q2 e COP2 são referentes ao ensaio com caudal de 55,7 m ³ /h).	98
Figura 5.14 - Diferença entre a temperatura no interior do armário e temperatura ambiente.	100
Figura 5.15 - Diferença entre a temperatura no interior do armário e a temperatura ambiente, para todos os ensaios realizados com uma carga térmica de 300W.	101

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Condutibilidade térmica de alguns tipos de solos, minerais e outros constituintes. Adaptado de McCorry & Jones (2011) ⁽¹⁾ , segundo a norma alemã VDI 4640, Banks (2008) ⁽²⁾ e Hillel (1982) ⁽³⁾	35
Tabela 3.2 - Calor específico de alguns tipos de solos, minerais e outros constituintes. Adaptado de McCorry & Jones (2011) ⁽¹⁾ , segundo a norma alemã VDI 4640, Rees et al. (2000) ⁽²⁾ e Farouki (1981) ⁽³⁾	37
Tabela 3.3 - Calor específico volumétrico de alguns tipos de solo e minerais. Adaptado de McCorry & Jones (2011) ⁽¹⁾ , segundo a norma alemã VDI 4640, e Banks (2008) ⁽²⁾	38
Tabela 3.4 - Difusividade térmica de alguns tipos de solo e minerais. Adaptado de McCorry & Jones (2011) ⁽¹⁾ , segundo a norma alemã VDI 4640, e Banks (2008) ⁽²⁾	39
Tabela 4.1 - Resumo das especificações do permutador de calor ar-solo. Adaptado de Calado (2016).	64
Tabela 4.2 - Algumas características técnicas do <i>data logger</i> PCE-T 1200 da PCE <i>instruments</i>	66
Tabela 4.3 - Algumas características técnicas Ventilador TD-800/200 da marca S&P	68
Tabela 4.4 - Exatidão da medição do multímetro Fluke, modelo 177 (Fluke, 2008).	72
Tabela 4.5 - Datas da monitorização da temperatura do solo ao longo de 24h nos locais A, B e C.	75
Tabela 4.6 - Tabela resumo das características de cada ensaio e datas de realização.	81

Lista de Símbolos

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

Símbolos Gregos

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

Índice Inferiores

c	Arrefecimento
h	Aquecimento
m	Média

Lista de Acrónimos

AC	Alternating current (Corrente Alternada)
BBU	Base Band Unit
BSC	Base Station Controller
BST	Base Station Transceiver
CFIUTE	Centro de Formação Integração UBI Tecido Empresarial
CO ₂	Dióxido de Carbono
COP	Coefficient of Performance (Coeficiente de Desempenho)
DAC	Direct Air Cooling
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
EAHE	Earth to Air Heat Exchanger
EBC	Estação Base de Controlo
EBT	Estação Base de Telecomunicações
EDGE	Enhanced Data Rates For GSM Evolution
FTTC	Fiber To The Cabinet
GSM	Global System for Mobile Communications
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
LTE	Long-Term Evolution
PCM	Phase-Change Material (Material de Mudança de Fase)
PVC	Policloreto de Vinilo
RRU	Remote Radio Unit

TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
TRX	Transceiver
UBI	Universidade da Beira Interior

Capítulo 1

1. Introdução

O primeiro capítulo tem como principal objetivo contextualizar a temática abordada na presente dissertação, enquadrando a mesma na situação atual, para tal serão apresentadas diversas pesquisas e estudos realizados nesta área científica, de modo a que contribuam para uma melhor compreensão desta dissertação.

A comunicação representa um papel muito significativo na vida humana. Logo desde muito cedo que as pessoas têm a inevitabilidade de comunicar entre si, transmitir necessidades, desejos, conhecimentos, etc. Surgindo assim a necessidade de meios eficientes de comunicação para economizar tempo, dinheiro e trabalho. Deste modo, desenvolveram-se as telecomunicações que permitem manter-nos em contacto com a família, amigos, colegas ou outra pessoa em qualquer parte do mundo.

Neste capítulo será efetuado um enquadramento geral da temática, salientando a importância e relevância que as telecomunicações têm ganho na vida da sociedade em geral. Será apresentada uma revisão bibliográfica sobre investigações e estudos que têm sido desenvolvidos nesta área, tendo em conta o contexto do estudo proposto. Apresentar-se-á a contribuição do estudo desenvolvido na presente dissertação, assim como, os objetivos da mesma. Na última secção do presente capítulo, será apresentada a estrutura da dissertação, de modo a facilitar e guiar o leitor para que possa ter uma perceção mais objetiva e clara acerca do estudo desenvolvido.

1.1. Perspetiva Geral

Devido à atual capacidade de transmitir e receber mensagens de voz e de texto, receber notícias, aceder a informações diversas, efetuar ligações à Internet, e a várias formas de entretenimento, as comunicações móveis permitem que as pessoas realizem as mais diversas tarefas, em qualquer lugar e com extrema facilidade.

A área das redes de comunicação e telecomunicações é uma das mais importantes da atualidade no contexto das novas tecnologias, pois está associada à conceção, implementação, operação e gestão das infraestruturas modernas de comunicação, bem como dos sistemas que lhes estão associados para transmitir e distribuir informação. Estas áreas têm tido em Portugal um desenvolvimento ímpar com a revolução dos serviços de telecomunicações, estando atualmente

os operadores empenhados na substituição das tradicionais redes de acesso, disponibilizando cada vez mais serviços suportados nas novas redes óticas.

Segundo Gouveia et al. (2018) a tecnologia de informação e comunicação (TIC) atualmente premeia as dimensões económica, social e ambiental de muitas nações mundiais, pelo que, o acesso, a adoção e a difusão deste tipo de tecnologias inovadoras e modernas proporcionam um crescimento económico, direcionado pelo conhecimento e estratégias de desenvolvimento.

De acordo com o relatório do grupo Ericsson (2018), no primeiro trimestre de 2018, o número total de subscrições de serviço móveis foi de cerca de 7,9 mil milhões, com 98 milhões de novas subscrições adicionadas nesse período. No mesmo trimestre, o número de subscrições de banda larga móvel cresceu aproximadamente 200 milhões, atingindo cerca de 5,5 mil milhões, refletindo um aumento ano a ano de cerca de 20%. Como previsto em relatórios anteriores realizados pelo mesmo grupo, o número de subscrições de smartphones excedeu as subscrições de banda móvel dos telemóveis básicos. De todas as subscrições, 60% são de smartphones, isto deve-se ao aumento na aquisição deste tipo de telemóveis, de todos os telemóveis vendidos os smartphones representam 85%.

Estes números traduzem uma crescente utilização destes dispositivos em detrimento dos telemóveis tradicionais, assim como o aumento das subscrições da tecnologia Long-Term Evolution (LTE), esta tecnologia aumentou aproximadamente 210 milhões para alcançar um total de 2,9 mil milhões (bilhões). Por outro lado, no mesmo período, tecnologias como GSM/EDGE-only (Global System for Mobile Communications/ Enhanced Data Rates For GSM Evolution) viram as subscrições diminuir 90 milhões.

Na Figura 1.1 encontram-se representadas as subscrições de serviços móveis por tecnologia utilizada, por milhares de milhões de subscritores, no período de 2013-2017, assim como a previsão da sua evolução até 2023, onde é notório que em 2017 a tecnologia LTE tornou-se dominante em relação às restantes tecnologias e o surgimento da tecnologia 5G. Esta é prevista que exceda os mil milhões de subscrições até o final de 2023. A tecnologia LTE continua a crescer sendo previsto que atinja os 5,5 mil milhões até o final de 2023. De salientar que na figura “billion” significa milhares de milhões.

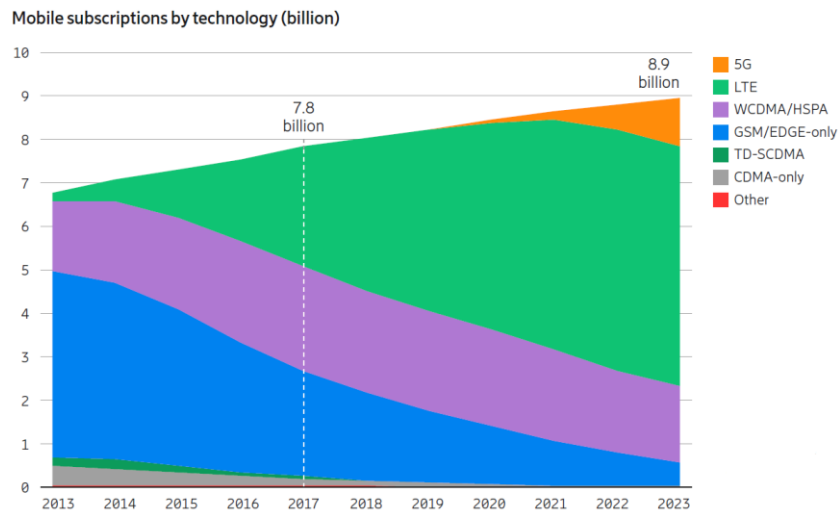


Figura 1.1 - Subscrições de serviços móveis por milhares de milhões de subscritores, no período de 2013-2017 e com previsão até 2023 (Ericsson, 2018).

O crescimento destas tecnologias, bem como o surgimento de novas, associado ao aumento do número de subscrições agregadas a *smartphones* e também do volume médio de dados por subscrição, contribuem para que o tráfego de dados móveis continue a crescer, impulsionado principalmente pelo aumento da utilização das redes sociais e pela maior transmissão e visualização de conteúdo de vídeo em resoluções mais altas. A previsão, aponta que, com o progresso na captação de vídeos, como vídeo de 360°, o consumo de tráfego de dados será certamente afetado, visto que, um vídeo em 360° consome de quatro a cinco vezes mais dados móveis do que um vídeo normal com a mesma resolução.

A Figura 1.2 mostra o aumento do tráfego móvel trimestral e tráfego de voz de todo o mundo, desde o primeiro trimestre de 2013 até o primeiro trimestre de 2018, juntamente com a variação percentual anual dos dados móveis. De salientar que, a partir do quarto trimestre de 2016, o crescimento do tráfego mundial foi visivelmente impulsionado acima da sua linha de tendência, este crescimento foi causado pela oferta de tráfego de dados móveis gratuitos na Índia. Entre o primeiro semestre de 2017 e o de 2018 o tráfego de dados móveis cresceu cerca de 54%.

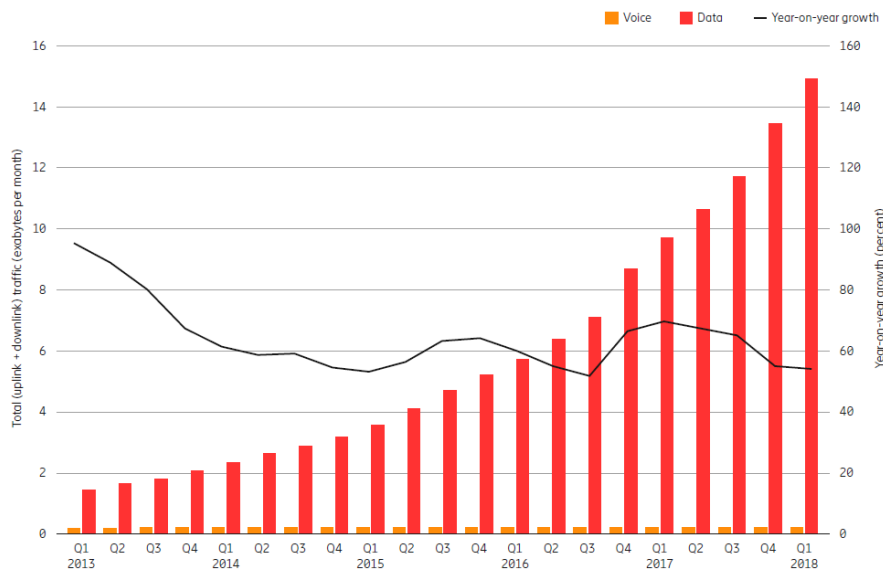


Figura 1.2 - Tráfego móvel mundial por tipo de utilização, desde o primeiro trimestre (Q1) de 2013 até ao primeiro trimestre (Q1) de 2018 (Ericsson, 2018).

A cobertura geográfica do serviço, ou seja, a capacidade de se conseguir comunicar em qualquer local, é uma das características mais importantes ao nível das telecomunicações, uma vez que a evolução dos transportes permitiu que as deslocações se tornassem cada vez mais facilitadas. Na Figura 1.3, está representada a estrutura base do sistema de comunicação móvel. O funcionamento deste sistema é relativamente simples, o telemóvel, do qual é realizada uma chamada telefónica, comunica com a Estação Base de Telecomunicações (EBT), também conhecida por BST (Base Station Transceiver), mais próxima ou com a que tenha sinal mais forte. Posteriormente a BST encaminha o sinal para a Estação Base de controlo (EBC), também conhecida por BSC (Base Station Controller). A flexibilidade deste sistema é garantida por dois conceitos muito relevante, o hand-off e o roaming. O hand-off permite a continuidade da chamada em andamento durante o intercâmbio de células (torres), o roaming permite a continuidade da chamada em andamento durante o intercâmbio de células (torres) com EBC's diferentes, (Azevedo)

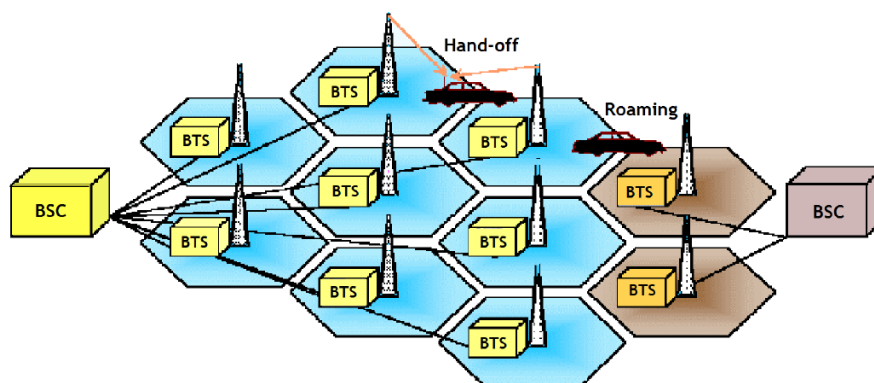


Figura 1.3- Sistema de comunicação móvel (Azevedo).

Nas redes móveis, a EBT é o principal consumidor de energia, principalmente alimentado pela concessionária. Essa energia tem um custo operacional significativo, bem como o custo ambiental em termos de emissões prejudiciais de gases de efeito estufa. Uma Estação Base de Telecomunicações típica consiste em diferentes subsistemas que consomem energia, esses subsistemas incluem:

- Processadores de banda básica: codifica o sinal digital original numa forma adequada para a transmissão;
- “Transceiver” (TRX): permite transmissão e recepção de sinais, também envia e recebe sinais de e para entidades de rede superiores, como a estação de base de controlo;
- Amplificador de potência: amplifica o sinal do TRX para transmissão através da antena, pode ser integrado com o TRX;
- “Combiner”: combina sinais de vários TRX’s para que possam ser enviados através de uma única antena, permitindo a redução no número de antenas usadas;
- “Multiplexer”: separa os sinais de envio e recepção de/para a antena, permite ainda realiza o envio e recepção de sinais através do mesmo cabo;
- Sistema de sinalização e alarme;
- Sistema de controlo: controla e gere as várias unidades EBT, incluindo qualquer software;
- Torre e antenas;
- Sistema de refrigeração: Constituído por ventiladores e/ou sistemas de ar condicionado.

Segundo Chen et al. (2011) as EBT’s consomem mais energia do que alguns edifícios públicos devido à alta densidade de calor gerado internamente e os horários especiais de operação. Posto isto, e de modo a assegurar a temperatura do ar interior, das EBT’s, dentro de uma faixa segura, é necessário manter os sistemas de arrefecimento em funcionamento quase todo o ano, como é exemplo o ar condicionado, o que faz com que estes sistemas usem cerca de 30 a 50% da eletricidade de toda a EBT, Tu et al. (2010).

Os “data centre”, ou centros de processamento de dados, são locais projetados para concentrar servidores, equipamentos de processamento e armazenamento de dados, e sistemas de ativos de rede, como “switches”, “routers” e outros. A quantidade de calor gerado pelos equipamentos de TIC existentes nos “data centre” faz com que seja necessário proceder ao seu arrefecimento durante todo o ano. Por sua vez, o aumento da procura de eletricidade e da pegada de carbono conduzem a um sério desafio para o desenvolvimento sustentável da civilização humana. Os sistemas de TIC causam 2% das emissões mundiais de carbono, correspondendo a 1/4 das emissões de CO₂ produzidas pelos carros de passageiros em todo o mundo, D’Aniello et al. (2018).

Conforme Ahmed et al. (2018), com os avanços tecnológicos, a energia renovável está a fazer incursões em todos os setores, incluindo as tecnologias de informação e comunicação (TIC). Pesquisas recentes mostram que alimentar as EBT's com energia renovável é tecnicamente viável, embora o custo de instalação dos sistemas de fornecimento de energia a partir de combustível não renovável seja ainda menor do que o de fonte renovável, o uso otimizado das duas fontes pode produzir melhores resultados.

De modo a colmatar os custos e diminuir o impacto ambiental relacionado com a ineficiência dos sistemas de arrefecimento, a obtenção de novas técnicas, com o intuito de alcançar um arrefecimento mais eficiente, é uma solução eficaz do ponto de vista da redução do consumo de energia de sistemas de arrefecimento. Uma boa solução é a utilização de permutadores de calor ar-solo, em que se utiliza a energia térmica do subsolo como método de arrefecimento dos armários de telecomunicações, tendo em vista um arrefecimento mais eficiente.

O princípio de funcionamento dos permutadores de calor ar-solo, como o próprio nome indica, baseia-se na troca de calor entre o solo e o ar de ventilação. O sistema começa por insuflar o ar para o interior das tubagens do permutador, que se encontram enterradas no solo. Por sua vez, à medida que o ar percorre as tubagens ocorre a permuta de calor entre o ar e o solo. Posteriormente o ar é insuflado no espaço que se pretende climatizar.

O solo, mesmo nas suas camadas mais superficiais, contém uma quantidade considerável de energia térmica, possuindo a particularidade de apresentar temperaturas que são aproximadamente constantes ao longo do ano. Comparativamente ao ar exterior, o solo apresenta uma amplitude térmica menor, verificando-se temperaturas superiores às verificadas no ar exterior nas estações frias e inferiores às constatadas nas estações quentes. Usufruindo desta característica do solo é possível que o ar exterior seja arrefecido ou aquecido nos períodos do ano onde as respetivas necessidades de arrefecimento e aquecimento são requeridas e deste modo proceder à climatização de espaços. Para além da climatização, também pode ser utilizado no sector agrícola para produção de alimentos em estufas e no setor industrial no arrefecimento de armários de telecomunicações, como referido anteriormente.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

Nos últimos anos, conceitos como energia renovável, conservação de energia e eficiência energética entraram em todos os setores da tecnologia, incluindo o sector das tecnologias da informação e comunicação (TIC). Há duas razões para isso, em primeiro lugar, o aumento do custo operacional do consumo de energia para os sistemas intensivos está a ser sentido em toda parte, uma vez que a tecnologia abrange todos os aspetos das nossas vidas.

Em segundo lugar, a indústria de TIC, sendo o setor que mais cresce, cumpre a sua obrigação de reduzir as emissões de CO₂ nocivas atribuídas a ela. Entre todos os subsectores das TIC, o

sector das telecomunicações em geral e a comunicação móvel em particular, mostraram um enorme potencial para melhorias na eficiência energética e na conversão de sistemas em fontes de energia limpas (renováveis). Como resultado, a comunicação futura não está mais focada apenas no aspeto visual e na produtividade ou qualidade de serviço. Em vez disso, um novo paradigma chegou, ou seja, eficiência energética com pegada de carbono reduzida, chamada comunicação verde, Hassan et al. (2013).

Como referido no ponto anterior, a estação base (BST) tem alta taxa de dissipação de calor interna, e a necessidade de arrefecimento existe quase o ano todo, o que faz com que os sistemas de refrigeração usem cerca de 30 a 50% da eletricidade de toda a BST.

Segundo Shende et al. (2013) o principal fator que leva à ocorrência de avarias nestes equipamentos é a temperatura, sendo responsável por mais de metade das mesmas. A probabilidade de ocorrência de falhas aumenta consecutivamente à medida que a temperatura de um componente eletrónico aumenta acima da sua temperatura de funcionamento. Ahmadi et al. (2014).

De modo a garantir a temperatura ideal é necessário recorrer a um sistema de controlo e climatização. Atualmente, para se proceder ao arrefecimento das BST's é utilizado o ar externo, que através de ventiladores, é ventilado para o seu interior de modo a dissipar o calor interno quando a temperatura e humidade do ar interno e externo satisfazem as condições desejadas. A este sistema, na maioria das vezes, é acoplado um ar condicionado que serve de complemento quando a capacidade de refrigeração dos ventiladores for inadequada. O ar condicionado funciona de forma independente quando o ar externo não reúne condições para ser ventilado diretamente para o interior, Chen et al. (2012).

Como se pode verificar na Figura 1.4, entre os elementos mencionados, a 'base station' é o componente que exige mais energia, consumindo aproximadamente 60% do total de energia consumida pela rede móvel. A comunicação móvel é o componente que apresenta um crescimento mais rápido dentro do setor de telecomunicações em particular e das TIC em geral. Prevê-se que o consumo anual global de energia da 'base station' crescerá de 49 TWh em 2007 para 98 TWh em 2020. Assim, as BTS tornaram-se o principal foco de investigação de modo a aumentar a eficiência energética na comunicação móvel, recorrendo à instalação de recursos renováveis, tais como, painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, Ahmed et al. (2018).

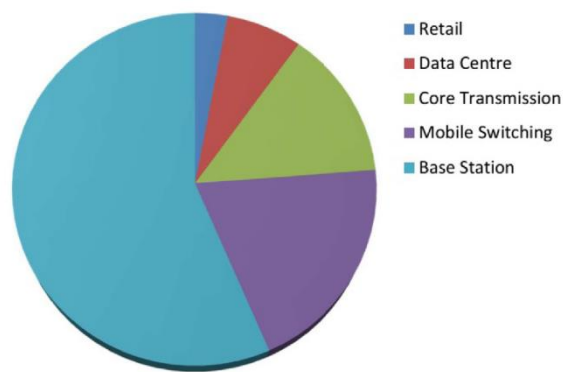


Figura 1.4 - Consumo de energia de elementos do sistema de comunicação (Ahmed, 2018).

O principal responsável pelo elevado consumo de energia nas EBT é o ar condicionado devido ao elevado tempo operacional. Segundo Chua (2013), Ebrahim (2015), Schmidt (2003) e Gillan (2002) os métodos existentes de economia de energia incluem tecnologia de frequência variável, ou seja, uso de um compressor de frequência variável permitindo que a rotação do mesmo seja reduzida à medida que exista ou não necessidade de arrefecimento, refrigeração por absorção utilizando calor residual nos “data centre”, técnica de autocontrolo do ar condicionado, tecnologia de arrefecimento utilizando uma fonte fria natural entre outros.

1.3. Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica encontra-se dividida em subsecções, iniciando-se com a apresentação de trabalhos relacionados com a aplicação de permutadores de calor ar-solo em diferentes áreas de aplicação, a título de exemplo, na agricultura, são utilizados no aquecimento e/ou arrefecimento de estufas. Adicionalmente, é exibida a comparação do desempenho de diferentes tipos de permutadores ar-solo e de sistemas híbridos. Estes últimos combinam a utilização de permutadores com outras soluções convencionais. Por fim, são apresentados trabalhos relacionados com a aplicação de permutadores de calor nos armários de telecomunicações.

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

Nesta subsecção serão revistas diversas pesquisas realizadas no sentido da utilização dos permutadores de calor ar-solo. O solo, no Verão, apresenta temperaturas inferiores à temperatura exterior, constitui-se como uma importante fonte fria e poderá, no período de Verão, intervir como uma fonte de dissipação de calor, dissipação esta que pode ocorrer por processos diretos ou indiretos. Por processos diretos entendem-se em ter uma ou mais superfícies da envolvente, do espaço a climatizar, em contacto com o solo, ou seja, totalmente

ou parcialmente enterrado. Em relação ao processo indireto recorre-se à utilização de permutadores ar-solo para a climatização do espaço.

Uma utilização curiosa de um permutador de calor ar-solo foi levada a cabo por Sharan et al. (2002) que propuseram a implementação deste sistema na jaula de um tigre em Ahmedabad na Índia. Devido às elevadas amplitudes térmicas sentidas ao longo do ano nessa região os autores dimensionaram e implementaram um permutador de calor ar-solo de modo a atenuar essas amplitudes térmicas e de certa forma contribuir para a preservação da espécie. O permutador é constituído por dois tubos em aço com 0,20 m de diâmetro, distanciados por 1,5 m com 20 m cada, perfazendo um total de 40 m de circuito de permuta de calor e enterrados a 1 m de profundidade. Com a implementação deste sistema, tanto no Verão como no Inverno, foi possível diminuir e aumentar a temperatura da jaula, com um volume de 192 m³, em cerca de 10 °C, mesmo esta estando completamente aberta.

O trabalho levado a cabo por Zukowski et al. (2017), realizado na Universidade Tecnológica de Bialystok, ao lado da faculdade de engenharia civil e engenharia ambiental, compara o desempenho térmico de dois tipos de permutadores de calor ar-solo. Um dos permutadores é um permutador de tubos e o outro é um permutador de placas, sendo que, ambos ocupam a mesma área, 12 m x 28 m, como se pode verificar na figura seguinte.

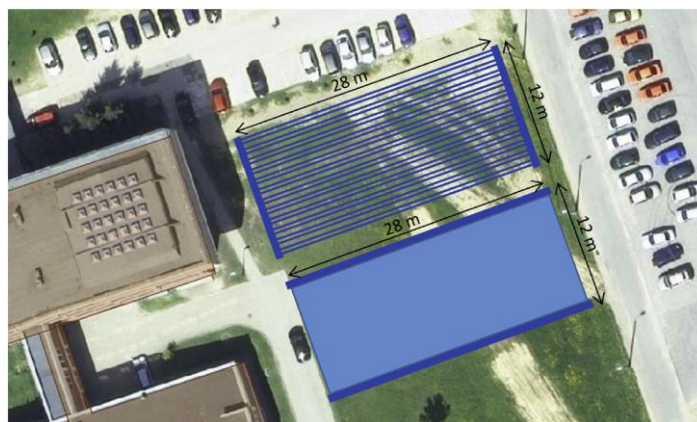


Figura 1.5 - Permutador de tubos e de placas (Zukowski, 2017).

No primeiro permutador, permutador de tubos, este é composto por coletores de ventilação e tubos transversais e foi utilizado um caudal volumétrico de 4050 m³/h. No caso do permutador de placas, foi utilizado um caudal volumétrico de 5820 m³/h. Ambos os permutadores estavam instalados a uma profundidade média de 2 m.

As medições foram realizadas entre maio e setembro de 2015 e novembro de 2015 e março de 2016. Com os resultados obtidos foi possível observar que ambos os permutadores são energeticamente eficientes e reduzem significativamente a temperatura do ar ventilado no verão e aumentam a temperatura do ar no inverno, ou seja, podem ser utilizados como

aquecimento e arrefecimento. Quando utilizados com a finalidade de aquecimento, estação de inverno, verificaram-se ganhos energéticos iguais a 13,5 MWh e 16,35 MWh para o permutador de tubos e placas, respetivamente. No que respeita ao arrefecimento, estação de verão, o desempenho do permutador de tubos foi menor. Este forneceu cerca de 10,3 MWh enquanto o de placas forneceu 20,41 MWh, o que significa que o permutador de placas é duas vezes mais eficiente no modo de arrefecimento, de salientar que os valores apresentados levam em consideração o consumo de energia dos ventiladores.

O estudo experimental realizado por Sharan et al. (2004), baseia-se da integração de um permutador de calor ar-solo de circuito fechado a uma estufa com uma área de 360 m², utilizada para o cultivo de tomate, localizado em Gujarat, na Índia. O permutador de calor apresenta duas fileiras, em que cada uma delas são constituídas por quatro tubos em aço espaçados entre si de 1,5 m apresentando cada um 23 m de comprimento e um diâmetro de 0,20 m, que são enterradas a profundidades diferentes, nomeadamente, 2 m e 3 m. Foi utilizada uma unidade de ventilação com um caudal de 7200 m³/h, o equivalente a 20 renovações de ar por hora. Os resultados obtidos foram promissores, visto que possibilitaram, em noites típicas de Inverno, aumentar a temperatura no interior da estufa de 15 °C para 22 °C, em 30 minutos. O mesmo permutador foi utilizado em modo de arrefecimento, permitindo diminuir a temperatura do ar em cerca de 7 °C. Por fim, os autores constataram uma diminuição do consumo de água de 34% e um aumento de 2,7 vezes no rendimento da produção de tomate, comparativamente à sua produção com a estufa sem o apoio do permutador de calor.

O estudo realizado por Mongkon et al. (2013), consiste na aplicação de um sistema de tubos horizontais subterrâneos para o arrefecimento de uma estufa agrícola num clima tropical da Tailândia. O estudo teve por base monitorizar o desempenho de arrefecimento e o fenómeno de condensação que ocorre no interior do sistema de tubos. A monitorização foi realizada em dias típicos das estações de inverno, verão e monções em Chiang Mai, norte da Tailândia. Os ensaios foram realizados com um sistema de tubos horizontais, com um comprimento de 38,5 m, enterrados a uma profundidade de 1 m e uma estufa cuja área é de 30 m². Esta experiência permitiu concluir que o coeficiente de desempenho (COP) do dia típico de verão foi maior que os dias de inverno e monções nos quais os valores de COP foram de 3,56, 2,04 e 0,77, respetivamente, enfatizando que a implementação destes sistemas em clima tropical tem potencial adequado para o verão ou durante o dia. Em relação ao fenómeno de condensação concluiu-se que embora possa haver quantidades mínimas de condensação, esta pode ser eliminada utilizando um ventilador após o término do arrefecimento.

No seguimento de trabalhos realizados em estufas, o estudo apresentado por Ozgener et al. (2017), apresenta uma investigação experimental relativa à eficiência termodinâmica de um permutador de calor ar-solo, vertical e horizontal, em circuito fechado, realizado no Instituto de energia solar da Ege University (Bornova, Turquia). Tendo este permutador a finalidade de proceder ao aquecimento de uma estufa agrícola entre 2009 e 2016, em modo contínuo, onde

foram obtidos mais do que 80.000 registros. De modo a melhorar a eficiência energética foi acoplado um sistema fotovoltaico para fornecer energia ao ventilador utilizado para a circulação do ar. Durante o período de aquecimento as temperaturas do ar à entrada e à saída do permutador variaram entre 3°C e 17.1°C, e entre 7°C e 24°C, respetivamente. Em média verificou-se uma diferença de 5°C entre a entrada e a saída. Estas temperaturas foram obtidas com um caudal de aproximadamente 2,73 m³/h. A estufa, sendo o objetivo proceder ao seu aquecimento, foi posicionada em direção ao sul e registados os valores da radiação solar incidente, esta variou entre os 0 e os 800 W/m². Após o estudo experimental e a interpretação dos dados obtidos chegaram à conclusão que em média o permutador de calor apresentou uma eficiência exergética de 55% e o ventilador uma eficiência exergética cerca de 68%, tendo no total obtido uma eficiência exergética de 70% para o período de aquecimento entre 2009 e 2016.

O trabalho experimental levado a cabo por Soni et al. (2016), no Energy Park, no campus da faculdade de tecnologia Laxmi Narayan em Bhopal, India, apresenta um sistema híbrido de ar condicionado tradicional e um permutador de calor ar-solo com a finalidade de reduzir o consumo de energia do ar condicionado. Deste modo, acoplaram um permutador de calor ar-solo ao ar condicionado. A montagem experimental consiste num tubo de aço galvanizado com 11 m de comprimento e 0.05 m de diâmetro interno, enterrado a uma profundidade de 3 m, uma sala de teste com 6,25 m² de área e um sistema de ar condicionado tradicional. Na figura seguinte é apresentado o esquema de montagem deste sistema.

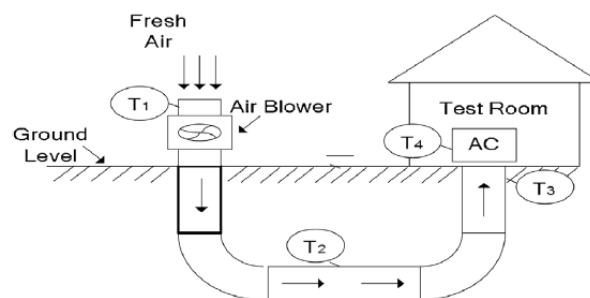


Figura 1.6 - Montagem do sistema híbrido, permutador ar-solo e AC tradicional (Soni, 2016).

De modo a obter uma avaliação deste sistema híbrido foram realizados 3 arranjos diferentes testando assim diferentes soluções. No primeiro arranjo o arrefecimento da sala de teste foi realizado apenas utilizando o ar condicionado, no segundo arranjo tanto o ar condicionado como o permutado de calor procederam ao arrefecimento da sala, e por fim o terceiro arranjo o ar condicionado era o responsável pelo arrefecimento da sala de teste, enquanto que o ar proveniente do permutador de calor tinha a função de arrefecer a serpentina do condensador do ar condicionado. Os testes experimentais foram realizados não só durante dias muito quentes, de 24 de maio de 2015 a 26 de maio de 2015, como também em dias intensos de

chuva, de junho de 2015 a setembro de 2015. Nos dias quentes, dias em que é mais relevante o arrefecimento da serpentina do condensador do AC, a temperatura ambiente variou entre os 36 e os 46 °C, enquanto a temperatura à saída do permutador variou entre 35,5 e 42 °C, com uma velocidade do ar de 11 m/s. Nestes mesmos dias constatou-se que o consumo total de energia poderia ser reduzido em 6,7 % e 10,9 % no arranjo 2 e 3, respetivamente, em comparação com o arranjo 1. Após os ensaios experimentais, concluíram que, com uma humidade do solo adequada, a eficiência do permutador de calor ar-solo aumenta, por esse motivo também se constatou que o consumo de energia do AC reduziu aproximadamente 4 a 5 % em dias chuvosos em comparação aos dias de verão. Conclui-se também que, reduzindo a velocidade do ar circulante no permutador até cerca de 5-7 m/s, conduz a uma redução de 2 % no consumo de energia, tanto no verão como nos dias chuvosos. O acoplamento do permutador ao AC acarreta vantagens como a redução do calor libertado para o ambiente, ao mesmo tempo que procede ao arrefecimento do condensador, a qualidade do ar interno pode ser mantida, mantendo assim o ar fresco no edifício de forma consistente.

1.3.2. Aplicação de permutadores de calor nos armários de telecomunicações

Segundo vários autores, metade do consumo energético dos armários de telecomunicações é devido ao sistema de arrefecimento, independentemente do sistema utilizado, sejam sistemas convencionais de ar-condicionado ou através de sistemas de ventilação forçada. Por essa razão tendem a surgir sistemas alternativos aos tradicionais equipamentos de ar-condicionado, tais como o permutador de calor ar-solo. A utilização do solo como fonte térmica como sistema de arrefecimento dos armários de telecomunicações começou a ser estudada há relativamente pouco tempo, pelo que, esta solução ainda se encontra em desenvolvimento. Devido a desse facto, verifica-se uma escassez de estudos relacionados com a aplicação de permutadores ar-solo como sistema de arrefecimento de um armário de telecomunicações. Nesta subsecção são apresentados alguns dos estudos realizados neste sentido.

O sistema de arrefecimento ar-solo, em forma de “T”, com ligação na parte inferior de um armário de telecomunicação típico FTTC (“Fibre to the Cabinet”), que foi desenvolvido por Yuping et al. (2008). Baseia-se em dois ventiladores que direcionam o fluxo de ar quente, produzidos pelos diversos dispositivos eletrónicos, para o solo. Neste, o calor será dissipado por meio de um conjunto de seis tubos constituídos em liga de alumínio e amónio, distribuídos paralelamente e horizontalmente, em formato característico de alhetas. Seguidamente, o ar arrefecido é de novo reintroduzido para o interior do armário. Após a análise dos resultados obtidos, tanto experimentais como por modelagem (CFD software: Flotherm 7.2), concluíram que, para este armário com 700 W de carga térmica e uma temperatura exterior de 30 °C, esta solução proporcionou a dissipação de mais de metade dessa mesma carga, tendo como consequência a redução da temperatura do ar interior do armário em aproximadamente 5 °C.

Assim, o permutador de calor mostrou-se bastante eficiente, apresentado um coeficiente de desempenho (COP) cerca de 110, um valor muito bom comparativamente ao COP sem permutador, que varia entre os 10 a 15. Outra conclusão que foi constatada pelos autores foi a redução significativa do ruído.

O trabalho experimental realizado por Hong et al. (2009) tem objetivo idêntico ao do trabalho apresentado anteriormente, ou seja, proceder ao arrefecimento de um armário de telecomunicações, sendo que a configuração e o tipo de fluido utilizado no permutador de calor no subsolo são diferentes. A grande diferença em relação ao estudo anterior foi que o fluido condutor não era ar, mas sim água. Neste caso o calor gerado no interior do armário é transferido para um permutador ar-água, no qual circula água, esta por sua vez dissipa o calor acumulado para o subsolo, através das paredes do permutador. Os autores chegaram à conclusão que este sistema procedeu eficazmente ao arrefecimento do armário, apresentando um COP dez vezes superior aos sistemas tradicionais de ar condicionado.

No seguimento de permutador utilizando água como fluido condutor, Hiroaki Ohbayashi et al. (2007) realizaram uma investigação baseada em dois testes distintos, um numérico e outro experimental. No que se refere ao teste numérico, foi realizada uma simulação para se entender a dimensão do permutador a utilizar. Deste modo, foram inseridos os dados relativos às potências dissipadas no interior do armário e a dimensão do armário. Em relação ao teste experimental foram utilizados três armários semelhantes, ainda que com características e finalidades diferentes. Foi também utilizado o permutador de calor para o aquecimento e arrefecimento do armário, no inverno e verão, respetivamente. Um dos armários foi modificado de forma a ser possível a circulação de água no seu interior para proceder ao seu arrefecimento. Outro armário foi equipado com uma fonte de calor, de modo a simular a carga térmica em funcionamento, de forma a obter-se a temperatura máxima que se iria atingir. O último armário foi utilizado simplesmente para guardar os equipamentos de medição de modo a proceder à monitorização das temperaturas registadas pelos termopares instalados nos outros dois armários.

De forma a controlar a temperatura no interior do armário, foi utilizado um simples controlador, responsável por ativar e desativar o sistema de bombeamento de água para preceder ao arrefecimento ou aquecimento do armário. No verão o controlador ativava o sistema de bombeamento quando a temperatura no interior do armário fosse superior a 35 °C, desativando o mesmo quando a temperatura fosse inferior a 30 °C. Na estação de inverno o sistema opera de forma similar, sendo que, quando as temperaturas no interior fossem inferiores a 3 °C ligava a bomba e acima dos 6 °C desligava de forma a aquecer o interior do armário. No final dos testes realizados, com os resultados obtidos, o sistema apresentou um COP de 12,5 com o permutador comparativamente ao sistema de ar condicionado, cujo COP era 3,5.

1.4. Objetivos e contribuição da presente dissertação

O objetivo principal da presente dissertação, incide na otimização e estudo experimental de um permutador de calor ar-solo de modo a efetuar o arrefecimento de um armário de telecomunicações.

Posto isto, os objetivos da dissertação são os seguintes:

Monitorização da temperatura do solo, em três locais diferentes da Universidade da Beira Interior, recorrendo a sondas já existentes;

Preparação e implementação de uma unidade experimental para o estudo do arrefecimento de um armário de telecomunicações por intermédio de um permutador de calor ar-solo;

Realização de ensaios, para diferentes cargas térmicas internas, de arrefecimento do armário de telecomunicações por intermédio de um permutador de calor ar-solo;

Avaliação do desempenho do permutador de calor ar-solo no arrefecimento do referido armário.

Capítulo 2

2. Gestão da temperatura num armário de telecomunicações

No presente capítulo vai ser analisada a influência da temperatura nos equipamentos eletrónicos e a necessidade de arrefecimento dos armários de telecomunicações. Assim, apresentar-se-ão as principais características térmicas dos equipamentos e a forma como a temperatura influencia tanto o seu bom funcionamento, assim como a sua fiabilidade e durabilidade.

Na literatura são propostas várias soluções para a eficiência energética e a poupança de energia. Alguns conjuntos de soluções focam-se na transmissão do sinal, ou seja, concentram-se em melhorar a eficiência dos amplificadores de potência (Faruk et al., 2013), no aprimoramento tecnológico de unidades de radiofrequência e na tecnologia de antenas inteligentes (Huawei, 2011), afim de reduzir o consumo de energia da rede para uma carga de tráfego superior (Chiaraviglio et al., 2013) (Blume et al., 2010). Por outro lado, surgem soluções diferentes onde o consumo de energia também pode ser reduzido atuando sobre os sistemas de ar condicionado, por meio de um ajuste correto do sistema de controlo (Wang et al., 2011) (Zhou et al., 2013), e até a implementação de sistemas de arrefecimento inovadores, como é o caso dos permutadores de calor ar-solo, sistema estudado na presente dissertação.

Apresentar-se-ão as principais fontes de calor presentes num armário de telecomunicação, e que são responsáveis pelas temperaturas elevadas sentidas no seu interior. De modo a obter um arrefecimento do armário de forma mais eficiente são apresentados os principais sistemas de arrefecimento implementados nos armários de telecomunicações e respetiva explicação do seu funcionamento.

2.1. Influência da temperatura nos equipamentos eletrónicos

O desenvolvimento tecnológico do setor das telecomunicações anda de mãos dadas com o aumento gradual do seu consumo de energia. O rápido desenvolvimento e a necessidade de comutação mais rápida, barata e poderosa levaram a alguns dos mais importantes avanços tecnológicos e sociais na história moderna. Nas últimas décadas, têm surgido várias alterações nos equipamentos de telecomunicação, mais especificamente, a tendência na diminuição do tamanho dos componentes eletrónicos, levando também a alterações na sua estrutura, surgindo deste modo a nano eletrónica. Com os avanços desta tecnologia surgiu a necessidades e

oportunidades de novos materiais e técnicas para ajudar a resolver alguns desafios relacionados com a geração térmica.

O surgimento da nano eletrônica traduziu-se num aumento da capacidade e de desempenho dos dispositivos, mas, por sua vez, acarretou uma consequência negativa, o aumento do calor dissipado por estes equipamentos (Moore e Shi, 2014). Nos últimos anos, o foco tem sido maximizar a economia e a eficiência energética de forma a manter uma temperatura ótima de operação dos equipamentos eletrônicos.

Com a redução do tamanho dos componentes eletrônicos a temperatura é uma das áreas que requer mais atenção. O calor gerado na superfície destes componentes pode não ser distribuído uniformemente ao longo da sua superfície, pelo que as regiões onde a temperatura é mais elevada são mais propícias ao surgimento de avarias, daí, a probabilidade de falha é determinada com base nessas regiões (Moore e Shi, 2014). A temperatura elevada e a não uniformidade na distribuição da temperatura acarretam consequências como as alterações nas propriedades, químicas e iónicas, dos materiais e oscilações nas propriedades elétricas dos componentes (Lakshminarayanan e Sriraam, 2014).

O principal fator que leva ao incorreto funcionamento e à diminuição da durabilidade dos componentes eletrônicos é a temperatura, sendo que, existem outros fatores que levam à ocorrência de avarias nestes componentes, tais como, poeiras, vibrações e humidade. Na Figura 2.1 podem-se observar esses mesmos fatores, realçando que mais de metade (55%) das avarias em equipamentos eletrônicos está relacionada com a temperatura.

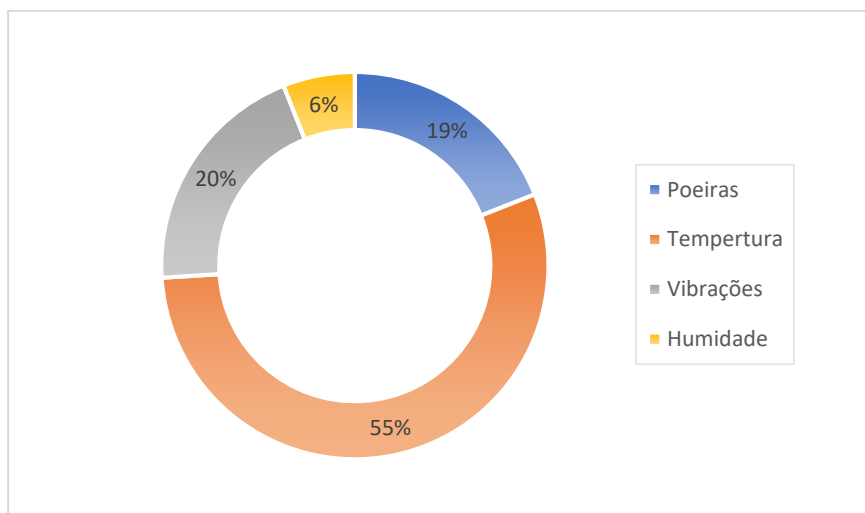


Figura 2.1 - Fatores que levam à diminuição da durabilidade e à ocorrência de avarias em componentes eletrônicos (adaptado de Shen e Mahalle, 2013).

O aumento da temperatura aliado a outros efeitos negativos, tais como a oxidação, electro migração, corrosão, contaminação e defeitos de montagem, aumenta a probabilidade de

ocorrência de falhas nos equipamentos, fatores determinados após vários modelos de análise de falhas de equipamentos. Posto isto, é possível concluir que, com estes efeitos negativos associados à temperatura elevada, a fiabilidade do equipamento é influenciada (Lakshminarayanan e Sriraam, 2014).

As temperaturas máximas e mínimas adequadas para um bom funcionamento dos equipamentos são especificadas pelos fabricantes, pelo que os mesmos podem possuir sistemas de arrefecimento interno que funcionam consoante a temperatura a que o equipamento se encontra sujeito. O tempo de vida útil decresce em cerca de 50% sempre que a temperatura de operação ultrapassa em 10 °C o valor estabelecido pelo fabricante (Ahmadi et al., 2014). Segundo a Norma ETSI (EN 300 019-1-3 V2.4.1) Classe 3.3, a temperatura máxima para estes equipamentos é de 55 °C.

Devido ao aumento do calor dissipado pelos dispositivos eletrónicos, os sistemas de arrefecimento possuem um papel fulcral de forma a melhorar o funcionamento e aumentar a durabilidade destes dispositivos, bem como reduzir as complicações que surgem devido às elevadas temperaturas. Com um bom controlo da temperatura dos equipamentos eletrónicos, no caso específico desta dissertação, os de telecomunicações, é possível que o ciclo de vida útil destes equipamentos se prolongue, possibilitando também um correto funcionamento dos sistemas de telecomunicações. Com a diminuição da temperatura em 10 °C o tempo médio sem ocorrência de avarias duplica (Purcell, 2012). A Figura 2.2 representa a relação entre o controlo da temperatura e o modo de funcionamento dos equipamentos de telecomunicações.

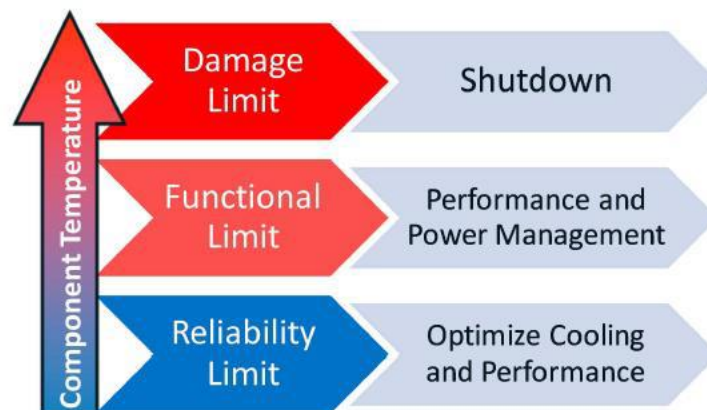


Figura 2.2 - Relação entre o controlo da temperatura e o modo de funcionamento dos equipamentos de telecomunicações (ASHRAE, 2012).

Na figura pode-se constatar que o desempenho dos equipamentos de telecomunicações é afetado pelo aumento da temperatura, em casos extremos, para reduzir os danos causados, estes equipamentos podem mesmo acabar por se desligarem. Esta situação ocorre com o intuito de proteger os mesmos dos efeitos adversos mencionados anteriormente, prevenindo uma

possível avaria ou danificação dos mesmos. O sistema de controlo responsável pela gestão térmica dos equipamentos deve agir em conformidade com as especificações térmicas, tomando as ações apropriadas para garantir essa conformidade.

Posto isto, é de enaltecer a importância de combater as elevadas temperaturas e manter a temperatura de funcionamento dentro dos limites recomendados, de forma a aumentar a durabilidade dos equipamentos e diminuir a frequência de avarias, reduzindo assim os custos de manutenção corretiva ou até mesmo a substituição por equipamentos novos. Segundo Tu et al. (2011), o calor gerado no interior de uma estação base de telecomunicações pode ser determinada pela seguinte formula, adaptada:

$$Q_L = Q_{IT} + KA(T_0 - T_r) + V\rho_a C_p(T_0 - T_r) + Q_s \quad (2.1)$$

Simplificando, tem-se:

$$Q_L = Q_{IT} + Q_{EN} + Q_A + Q_s \quad (2.2)$$

Em que:

- Q_L - Potência térmica, [W];
- Q_{IT} - Emissão térmica dos equipamentos de tecnologia e informação, [W];
- Q_{EN} - Calor trocado por condução e convecção, [W];
- Q_A - Calor trocado por infiltração e/ou extração de ar, [W];
- Q_s - Calor trocado por radiação, [W];
- K - Coeficiente de transferência de calor global, [W/(m²/°C)]
- A - Área, [m²];
- T_0 - Temperatura exterior, ambiente, [°C];
- T_r - Temperatura no interior da EBT, [°C];
- V - Volume de ar infiltrado, [m³/s];
- ρ_a - Densidade do ar, [kg/m³];
- C_p - Calor específico do ar, [J/(kg°C)].

A Figura 2.3 ilustra as fontes de calor numa estação base de telecomunicações.

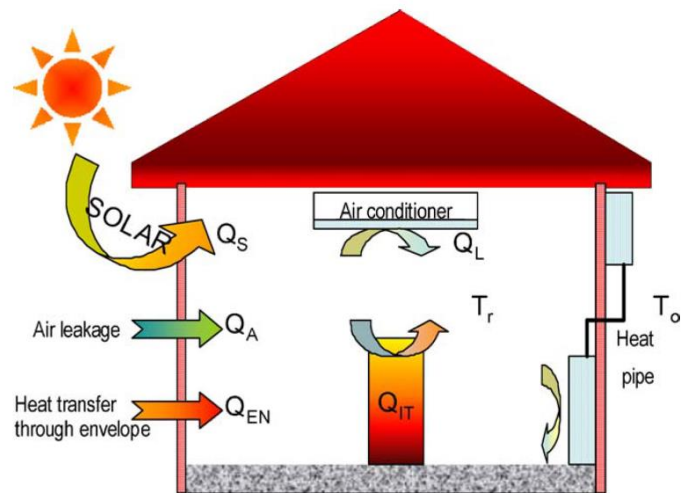


Figura 2.3 - Fontes de calor numa estação base de telecomunicações (EBT) (Tu, 2011).

Tal como acontece nas estações base de telecomunicações, as fontes de calor que atuam num armário de telecomunicações, instalado no exterior, têm a mesma origem. Na Figura 2.4 estão ilustradas as fontes de calor que atuam neste equipamento.

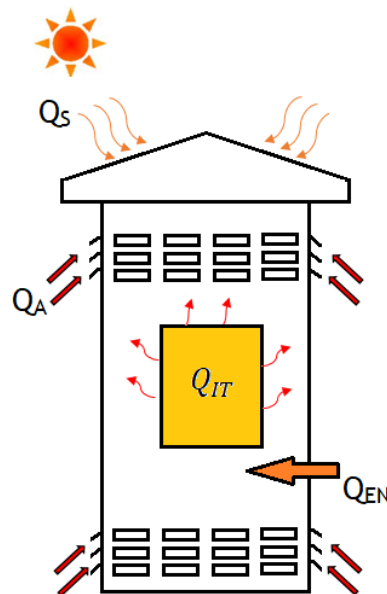


Figura 2.4 - Fontes de calor num armário exterior de telecomunicações.

Como se pode constatar pela figura, existem diversas fontes de calor num armário de telecomunicações que causam o aumento da temperatura no seu interior. Uma das fontes é a radiação solar (Q_s), este tipo de transmissão de calor não necessita de um meio físico para ocorrer, pelo que a sua propagação acontece através de ondas eletromagnéticas contidas no espectro ultravioleta e infravermelho. A radiação solar ao incidir na estrutura (paredes e teto) é parcialmente absorvida, resultando, desta forma, no aquecimento interno do armário. Um maior ou menor aquecimento é conseguido à custa duma variação do sombreamento e também

da capacidade da superfície refletir a radiação incidente. Ignorar a radiação solar pode resultar em temperaturas internas excessivamente altas causando problemas de confiabilidade dos equipamentos ou mesmo a sua falha (Wankhede et al., 2007). A equação 2.3 exhibe a fórmula matemática correspondente a este processo.

$$Q_{rad} = A\varepsilon\sigma T_s^4 \quad (2.3)$$

Onde:

- Q_{rad} - Fluxo de calor por radiação, [W];
- A - Área da superfície exposta, [m²];
- ε - Emissividade da superfície;
- σ - Constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$ [W(m²/K⁴)];
- T_s - Temperatura absoluta da superfície, [K];

Outra das fontes de calor é o calor trocado através da convecção e condução (Q_{EN}), com o ar circulante e das paredes. A transferência de calor por condução, é uma forma de troca de calor através dos materiais, originada pela propagação de vibrações a nível molecular. O fluxo de calor ocorre sempre a partir da região com temperatura mais elevada para a região de temperatura mais reduzida. Este tipo de transferência de calor ocorre mais intensamente nos materiais sólidos, seguido dos líquidos e por fim os gasosos, onde é muito mais difícil de ocorrer. Na equação 2.4 é apresentada a fórmula matemática correspondente a este processo.

$$Q_{cond} = \frac{AK}{L} \Delta T \quad (2.4)$$

Onde:

- Q_{cond} - Fluxo de calor por condução, [W];
- A - Área da superfície de permuta, [m²];
- K - Condutibilidade térmica do material, [W/(m K)];
- L - Espessura, [m];
- ΔT - Diferença de temperaturas, [K].

A convecção, é o processo de transferência de calor entre a superfície de um corpo sólido e um fluido que o rodeia. Esta forma de transmissão de calor pode ocorrer de forma natural, denominada como convecção natural, onde os movimentos do fluido (correntes de convecção) são originados pelo próprio fenómeno de transmissão de calor, isto é, as forças de impulsão

devidas à variação da densidade do fluido, no caso do armário de telecomunicações, o fluido é o ar. Por outro lado, pode ocorrer de forma forçada, denominada como convecção forçada, isto é, as correntes de convecção são originadas por uma causa mecânica externa ao próprio fenómeno de transmissão de calor (ventilador, bomba, entre outros). A fórmula matemática para obter a taxa de transmissão de calor por convecção encontra-se representada na equação 2.5.

$$Q_{conv} = Ah(T_s - T_{\infty}) \quad (2.5)$$

Onde:

- Q_{conv} - Fluxo de calor por convecção, [W];
- A - Área da superfície, [m²];
- h - Coeficiente de transferência de calor, [W/(m² K)];
- T_s - Temperatura da superfície, [K];
- T_{∞} - Temperatura do fluido adjacente, [K].

Na Figura 2.5 estão representados os três modos de transmissão de calor referidos anteriormente.

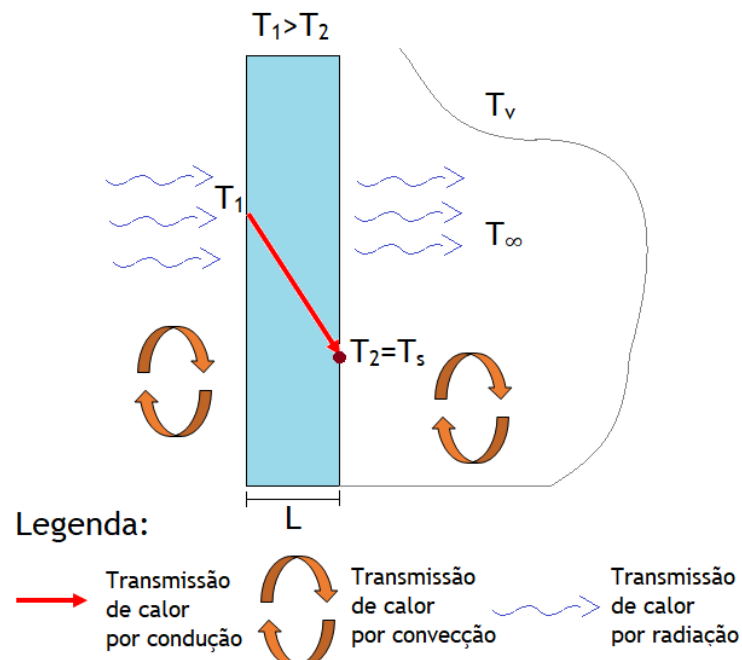


Figura 2.5 - Representação dos três modos de transmissão de calor.

Quanto à emissão térmica dos equipamentos de tecnologia e informação, ocorre por efeito Joule (Q_T). É o calor libertado pelos equipamentos eletrónicos existentes no interior do armário

de telecomunicação que é gerado quando uma corrente elétrica percorre um condutor elétrico num determinado período de tempo. Assim, sempre que uma corrente elétrica atravessa um material condutor, há produção de calor, isto acontece porque todos os equipamentos possuem um valor de resistência elétrica por mais baixo que seja. O calor é produzido e dissipado quando há resistência na passagem do eletrão, por sua vez, parte da sua energia é convertida em energia calorífica. Em grande parte de aplicações relacionadas com energia elétrica, a produção de calor correspondente a perdas e, em algumas situações pode originar danos de diferentes graus de gravidade.

Por último, o aquecimento dos armários devido à infiltração do ar exterior quente (Q_A), ocorre através das aberturas na parte inferior do armário e acontece principalmente na estação de verão. Este fenómeno observa-se normalmente quando se está a proceder ao arrefecimento do armário, não sendo possível atingir a temperatura desejada no interior do armário tão rapidamente nem com tanta eficiência. Quando o sistema de arrefecimento é efetuado recorrendo a sistemas de ventilação forçada, este fenómeno verifica-se na maioria dos casos. O vento também pode influenciar na ocorrência deste fenómeno.

A ventilação natural promove, até um certo ponto, o arrefecimento através das aberturas, na parte lateral e superior dos armários. O fluxo de calor ocorre pela tendência natural da variação da densidade do ar, isto é, o movimento dos fluidos é causado pelas variações de massa volúmica a partir das variações de temperatura - fenómeno de convecção natural-. A ventilação natural terá dificuldades em manter a temperatura interna no intervalo de temperaturas desejado. Pelo que, geralmente, este tipo de armários possui um sistema de arrefecimento interno, normalmente ventiladores, com diferentes modos de funcionamento, de forma a manter a temperatura no interior dentro dos valores recomendados. Os ventiladores aumentam o fluxo de ar e, conseqüentemente, a capacidade de arrefecimento, que mesmo assim não fornece o arrefecimento ideal. No entanto, sujidade, detritos e poluentes poderão entrar no armário, podendo causando danos aos equipamentos, pelo que, as entradas de ar contêm filtros, mas precisam de manutenção regular e não podem impedir a entrada de humidade e poluentes.

2.2. Métodos e sistemas de arrefecimento de armários de telecomunicações

Como referido anteriormente, os componentes eletrónicos têm-se tornado mais poderosos e complexos, surgindo assim um problema crítico relacionado com o calor gerado pelos mesmos. O elevado fluxo de calor gerado por dispositivos eletrónicos exige sistemas de arrefecimento eficientes para a dissipação do calor, ou seja, é necessário manter estes dispositivos a uma temperatura aceitável de funcionamento. Em cada sistema é utilizado um método de arrefecimento diferente, existindo dois métodos de arrefecimento distintos, os ativos e os

passivos. Os ativos utilizam sistemas mecânicos para auxiliar o arrefecimento, consumindo assim energia elétrica. Por outro lado, os sistemas passivos não utilizam sistemas mecânicos para auxiliar o arrefecimento. (Shende e Mahalle, 2013).

Para se proceder ao arrefecimento apenas através de métodos passivos, geralmente, é necessário que a temperatura exterior seja inferior à temperatura no interior do armário, sendo que existem algumas exceções, por exemplo, os sistemas de arrefecimento evaporativo, de arrefecimento radiante e geotérmicos. Além da convecção natural, a mudança de fase de um dado componente também é um método passivo. Tanto a evaporação como a condensação são processos que precisam de calor podendo assim proceder ao arrefecimento dos armários de telecomunicações externos. Existe uma grande variedade de sistemas de arrefecimento passivos dos armários de telecomunicações exteriores, tais como, os materiais de mudança de fase (PCMs), os permutadores de calor por convecção natural, caso de alguns permutadores geotérmicos, os termosifões, as superfícies alhetadas, entre outros. (Shende e Mahalle, 2013; Samba, 2013).

Os materiais de mudança de fase (PCMs) receberam uma considerável atenção na última década para o seu uso em sistemas de arrefecimento de equipamentos eletrónicos. Sendo um sistema passivo não necessita de energia elétrica. Os PCMs são materiais com características específicas que podem armazenar o calor dissipado pelos equipamentos eletrónicos na forma de calor sensível ou latente. Consoante a faixa de temperatura, estes materiais mudam de fase, ou seja, dependendo da temperatura os materiais mudam o seu estado físico, de sólido para líquido - processo de fusão - absorvendo energia. No processo inverso, passam de líquido a sólido - processo de solidificação - é libertada a energia armazenada. O funcionamento deste sistema está dependente da diferença de temperatura entre o interior do armário e a temperatura exterior, visto que é necessário que exista uma diferença relativamente significativa. Assim, quando a temperatura no interior do armário e a temperatura de solidificação do material for superior à temperatura exterior, o material armazena a energia sob a forma de calor sensível ou latente, através do processo de solidificação. Quando o inverso se verifica, os PCMs absorvem a energia térmica dissipada pelos equipamentos, originando o processo inverso, a fusão, e arrefecendo o ar interior. A Figura 2.6 representa o comportamento físico de um material de mudança de fase.

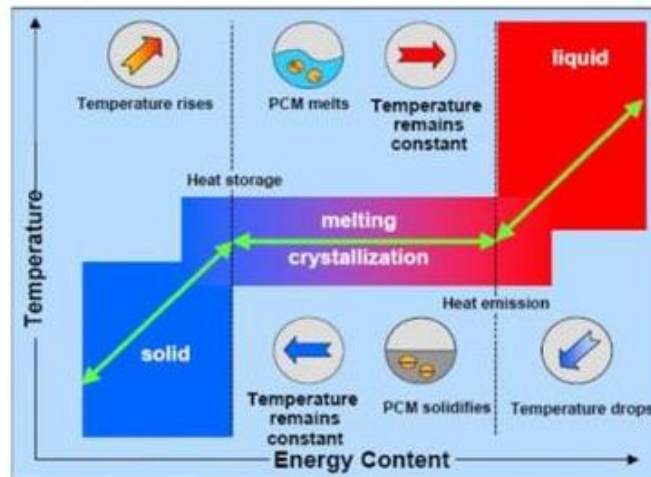


Figura 2.6 - Comportamento físico de um material de mudança de fase (Mejizade, 2017).

O sistema de termosifão bifásico de circuito fechado, outro método passivo muito idêntico ao anterior, opera passivamente com a circulação natural do fluido de trabalho sem a necessidade de energia elétrica. A capacidade de arrefecimento deste sistema deve-se ao facto do fluido mudar de fase, do estado líquido para o gasoso, a mudança de fase ocorre no evaporador, onde o fluido absorve o calor existente no interior do armário, reduzindo assim a temperatura no seu interior. Por sua vez, transmite o calor para o exterior, através do condensador, ocorrendo de novo uma mudança de fase, neste caso do estado gasoso para líquido. O fluido desloca-se no interior do circuito por convecção natural devido à variação de massa volúmica com o aumento da temperatura. Este sistema funciona com baixas diferenças de temperatura e pressão entre o condensador e o evaporador, pois o fluido de trabalho está nas fases líquida e gasosa. Sendo que, quanto maior for a diferença de temperatura entre o interior do armário e o exterior, melhor será o desempenho térmico do sistema, demonstrando assim que o desempenho está diretamente relacionado com esta diferença de temperatura (Samba, 2013). Na Figura 2.7 é possível visualizar o modo de funcionamento e instalação de um termosifão bifásico de circuito fechado.

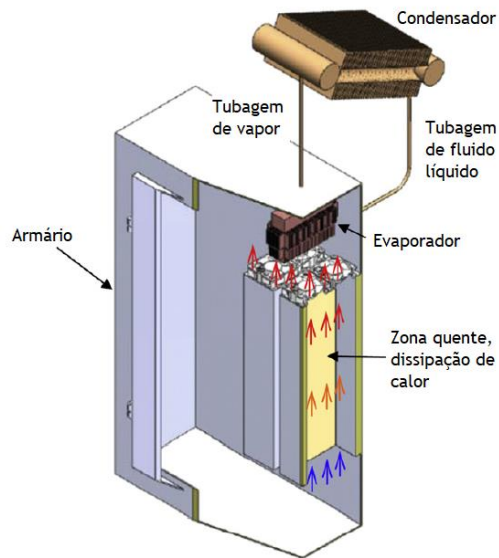


Figura 2.7 - o de funcionamento e instalação de um termostato bifásico de circuito fechado para arrefecimento de um armário de telecomunicações (Samba, 2013).

Outra forma de obter um método de arrefecimento passivo é aproveitar a inércia térmica do solo para arrefecer os armários de telecomunicações. Este tipo de arrefecimento será aprofundado no capítulo seguinte. Nas estações mais quentes é crítico que as tecnologias de arrefecimento funcionem devido à alta temperatura da atmosfera. No entanto, a temperatura do solo é mais estável, pois o impacto da temperatura do ar no solo torna-se mais reduzido com o aumento da profundidade, sendo que a uma profundidade de 5 m a temperatura mantém-se praticamente constante ao longo do ano (Hong, 2009). O aproveitamento do solo como método de arrefecimento pode ser obtido através da circulação direta do ar, proveniente do interior do armário, pelo subsolo ou recorrendo a sistemas como permutadores de calor geotérmicos, onde no seu interior podem circular fluidos gasosos ou líquidos. Este tipo de sistemas pode funcionar apenas com a circulação natural do ar - convecção natural -, sendo que, de modo a aumentar a eficiência de arrefecimento do sistema é hábito recorrer-se a ventiladores para a circulação do ar. Ao utilizar sistemas de ventilação este método de arrefecimento passa, assim, de método passivo a semi-ativo (Yuping, 2008; Hong, 2009). A Figura 2.8 representa um sistema de arrefecimento pelo solo, em que o ar quente proveniente do interior do armário é forçado, através de um sistema de ventilação, a circular pelos tubos instalados no solo, ocorrendo a troca de calor entre o ar e o solo. Posteriormente o ar reentra no armário com temperatura mais baixa.

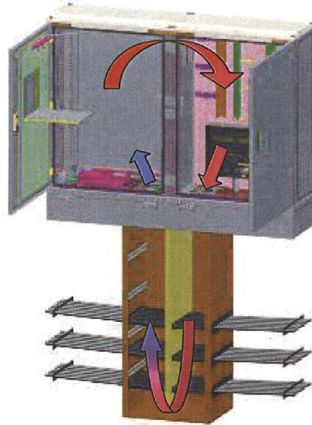


Figura 2.8 - Permutador de calor ar-solo para arrefecimento de um armário de telecomunicações (Yuping, 2008).

Outro sistema de arrefecimento através do solo é representado na figura 2.9. A grande diferença com o sistema apresentado anteriormente é o fluido circulante, que neste caso é água. O arrefecimento do ar quente proveniente do interior do armário acontece pelo contacto, deste mesmo ar, com o permutador de calor água-solo, também neste caso a circulação do ar é obtida através de um sistema de ventilação.

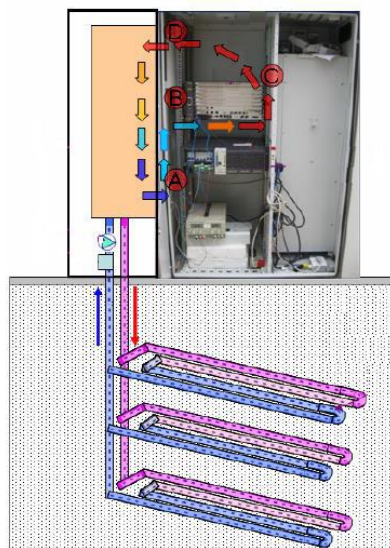


Figura 2.9 - Permutador água-solo para arrefecimento de um armário de telecomunicações (Hong, 2009).

Os métodos ativos, são a primeira escolha para o arrefecimento de armários de telecomunicações, pois possuem uma elevada capacidade de arrefecimento. Estes métodos são conhecidos pela sua capacidade de dissipar grandes quantidades de calor para o exterior, permitindo ainda que a temperatura no interior do armário de telecomunicações seja mais baixa que a temperatura exterior, dependendo do sistema utilizado. Os sistemas de ar

condicionado convencionais, sendo muito atuais, são os sistemas de arrefecimento ativo mais instalados nos armários de telecomunicação para proceder ao seu arrefecimento.

Recorrer aos sistemas de ar condicionado é sem dúvida uma boa escolha para aumentar a durabilidade dos equipamentos, pois além de permitirem temperaturas no interior dos armários de telecomunicações inferiores às temperaturas exteriores, também possibilitam o controlo de humidade do ar. No entanto, este sistema apresenta fortes desvantagens, tais como, custo de aquisição e manutenção, e o elevado consumo energético (Wankehede, 2007). Porém a escolha do sistema de arrefecimento recai nestes sistemas devido ao elevado desempenho térmico. Os sistemas de ar condicionados utilizam um gás refrigerante, que circula em circuito fechado, para proceder ao arrefecimento do interior dos armários. O arrefecimento processa-se recorrendo ao ciclo de compressão de vapor, onde a passagem do ar quente, forçado por um ventilador, no evaporador faz com que o gás absorva o calor do ar quente vindo do interior do armário. Seguidamente, o calor será libertado pelo gás, através da passagem de ar forçado no condensador, localizado no exterior do armário (Purcell, 2012). A Figura 2.10 representa o esquema de funcionamento de um sistema de ar condicionado e o fluxo de ar. Na Figura 2.11 é possível visualizar uma unidade de ar condicionado implementado num armário de telecomunicações.

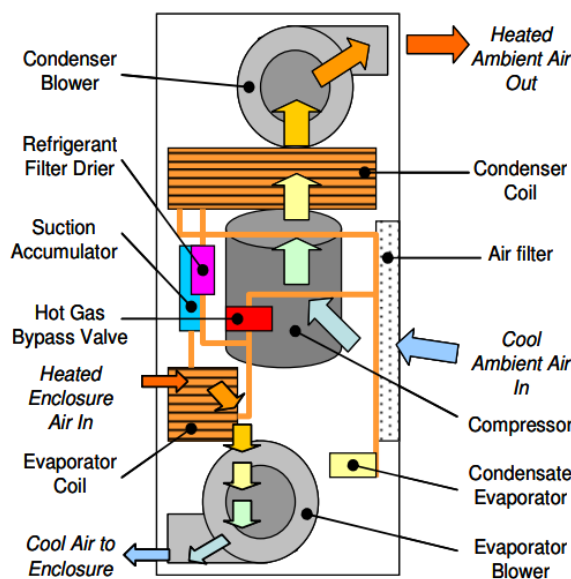


Figura 2.10 - Esquema de funcionamento de um sistema de ar condicionado e os diversos componentes (Purcell, 2012).



Figura 2.11 - Unidade de ar condicionado implementado num armário de telecomunicações (Purcell, 2012).

Outro método ativo de arrefecimento é o arrefecimento direto pela passagem de ar (DAC - Direct Air Cooling). Devido ao elevado consumo de energia elétrica dos sistemas de AC, este sistema é uma boa solução, visto que possui baixos consumos energéticos. Sendo que o único sistema de consumo de energia é o sistema de ventilação, por esse motivo não necessita de uma manutenção tão regular, requerendo apenas da limpeza ou substituição dos filtros instalados nas entradas de ar. Estes sistemas funcionam em circuito aberto, onde o ar exterior é forçado a passar pelo interior do armário, existindo, assim, transmissão de calor por convecção forçada entre o ar e os equipamentos eletrónicos, posteriormente, esse ar é expelido para o exterior. Deste modo é possível reduzir a temperatura dos equipamentos eletrónicos existentes no interior do armário. Pelo facto de utilizar o ar exterior como meio dissipador de calor, este sistema depende, inevitavelmente, da diferença de temperatura entre o interior do armário e o ar exterior. De modo a existir arrefecimento dos componentes eletrónicos, a temperatura exterior tem de ser mais baixa que a temperatura dos componentes. Devido ao facto do bom funcionamento deste sistema estar diretamente relacionado com a temperatura exterior é recomendada a sua utilização em regiões onde as condições climáticas são amenas (Lubritto et al., 2011). Durante o funcionamento deste sistema de arrefecimento, o ruído dos ventiladores é apresentado como um dos principais inconvenientes (Purcell, 2012). Na Figura 2.12 é representado o modo de funcionamento e o sentido do fluxo de ar deste tipo de sistemas. De salientar que o armário em estudo na presente dissertação, em modo de funcionamento original, utiliza um sistema de arrefecimento por convecção forçada idêntico ao descrito anteriormente.

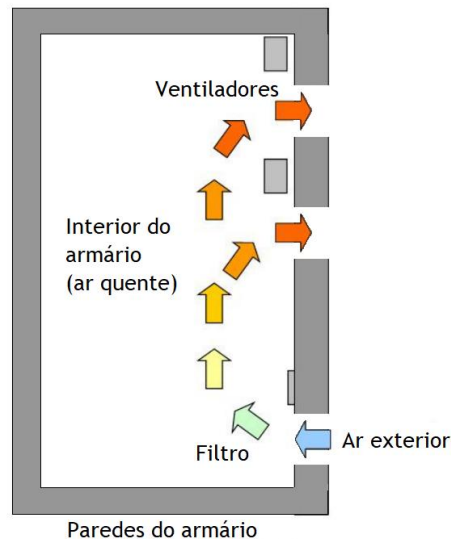


Figura 2.12 - Modo de funcionamento de um sistema de arrefecimento direto pela passagem de ar (DAC) (Purcell,2012).

2.3. Nota conclusiva

Em suma, no capítulo que agora se encerra abordou-se a influência da temperatura nos equipamentos eletrónicos e a necessidade de arrefecimento dos mesmos. Transpondo esse problema para os equipamentos eletrónicos de telecomunicações que se encontram no interior dos armários de telecomunicações. De seguida foram referidas, representadas e explicadas as fontes de calor que originam o aumento da temperatura no interior de um armário exterior de telecomunicações e também numa estação base de telecomunicações. Essas fontes de calor podem fazer-se sentir por radiação, condução ou convecção (natural ou forçada). Posteriormente, e na parte final, foram referidos os métodos de arrefecimentos utilizados nos armários de telecomunicações, métodos ativos e passivos. Os métodos ativos apresentados foram os sistemas de ar condicionado convencional e o sistema de arrefecimento direto pela passagem de ar (DAC) (utilização de ventiladores). Em relação aos métodos passivos apresentaram-se os materiais de mudança de fase (PCMs), o sistema de termossifão bifásico de circuito fechado e dois sistemas de permutadores de calor geotérmicos, água-solo e ar-solo. Este último enquadra-se no sistema estudado nesta dissertação, em que se utiliza um permutador de calor ar-solo.

Capítulo 3

3. Climatização por meio de permutadores de calor ar-solo

No capítulo que se segue será abordado o solo como fonte térmica e a potencialidade que este possui para ser utilizado na climatização (aquecimento e arrefecimento) de diferentes espaços. Um dos sistemas existentes para usufruir desse potencial é recorrendo aos permutadores de calor ar-solo. A sua utilização, de modo a aproveitar a energia proveniente do solo, é considerada uma estratégia com grande potencial na mitigação do consumo energético na área da climatização de espaços. O tipo de energia onde é utilizado o solo como fonte térmica, é denominada energia geotérmica.

O termo geotermia corresponde a uma palavra que deriva do Grego, “Geo = Terra e Termia = calor”, ou seja, corresponde ao chamado “calor da Terra”, o qual advém quer da absorção da radiação solar pelo solo, quer da energia interna da terra. Este “calor da Terra” (leia-se energia geotérmica) pode ser retirado do interior do solo e ser convertido em energia térmica e/ou elétrica. Quando convertida em energia térmica pode ser utilizada em sistema de climatização (quer no modo de aquecimento, quer no modo de arrefecimento), e em instalações de produção de águas quentes, tanto em grandes instalações como nas pequenas instalações do setor residencial. A exploração deste recurso energético permite obter reduções significativas nos custos de exploração e nas emissões de dióxido de carbono.

Visto que o solo é um recurso de fácil acesso, nos últimos anos o aproveitamento da energia geotérmica de baixa profundidade tem sido alvo de várias investigações. Deste modo, no decorrer do presente capítulo serão apresentadas várias geometrias de permutadores de calor ar-solo, o seu princípio de funcionamento, os parâmetros e fatores que influenciam o seu desempenho térmico e as fórmulas matemáticas que permitem proceder à sua análise energética.

Por fim, serão apresentadas algumas aplicações deste tipo de tecnologia com a finalidade de aquecer ou arrefecer um espaço, demonstrando que são variadas as áreas de aplicação destes sistemas.

3.1. Solo enquanto fonte térmica

Com a tendência crescente do consumo de energia fóssil e aquecimento global, a exploração de um novo recurso energético torna-se mais urgente e recente. O solo tem uma capacidade relativamente forte para armazenar energia geotérmica, especialmente a uma grande profundidade. A energia geotérmica é caracterizada como uma energia renovável, sustentável e limpa (ou seja, com baixa emissão de dióxido de carbono), (Lai et al., 2014).

3.1.1. Regime térmico

Segundo Batjes & Brigdges (1992), o solo é considerado um sistema heterogêneo, ou seja, é constituído por uma fração sólida e por espaços porosos. A parte sólida é composta por minerais e matéria orgânica. Os poros encontram-se ocupados por água e ar, que podem estar em forma conjunta ou isolada, podendo ocorrer variações no seu estado físico. Posto isto, as características e as proporções de cada fase que constitui o solo (i.e., sólido, líquido e gasoso) influenciam as suas propriedades térmicas (Rees et al., 2000). Existe ainda a possibilidade de incluir o gelo na fração sólida, quando a água que ocupa os poros congela, esta situação é propícia de acontecer nas regiões mais frias.

As camadas mais superficiais do subsolo são caracterizadas por mudanças dinâmicas de temperatura, que são influenciadas pelas condições climáticas locais, bem como a estrutura e as características físicas do solo (tipo de solo, leito de rocha, características hidrogeológicas, tipo de cobertura do solo, entre outros) (Bryś et al., 2018).

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

A amplitude das variações diárias e sazonais da temperatura do solo diminui com a profundidade. Segundo Zhou et al. (2016), a temperatura do solo ao longo da profundidade pode ser dividida em duas regiões: zona “thermocline”, solo superficial (0 - 10 m), onde a temperatura do solo varia com o tempo e a mudança sazonal é óbvia; zona termostática, solo mais profundo (10 a 100 m), na qual a temperatura do solo se mantém quase constante durante um ano inteiro.

Na zona “thermocline”, a energia contida no solo provem principalmente da radiação solar, que varia com a latitude, estação do ano, dia e noite e cobertura da superfície, etc. Na zona termostática, com o aumento da profundidade, a variação da temperatura é menor, e abaixo de uma certa profundidade, a temperatura do solo permanece relativamente constante ao longo do ano. Isto ocorre devido ao fato de que a influência das flutuações de temperatura na superfície do solo diminuem à medida que a profundidade do solo aumenta, por causa da alta

inércia térmica do solo. Assim, é correto afirmar que, com o aumento da profundidade, a amplitude térmica diminui. A profundidades muito elevadas, a temperatura aumenta lentamente com o aumento da profundidade nessa zona, geralmente designado por gradiente geotérmico.

A existência do gradiente geotérmico demonstra o fato de que há energia que sai do núcleo da terra, que leva à elevação da temperatura com o aumento da profundidade (Zhou et al., 2016). Na Figura 3.1 estão apresentados dados de dois estudos realizados no âmbito da monitorização da temperatura do solo, em localidades, profundidades e anos distintos, onde se podem verificar os fenómenos descritos anteriormente.

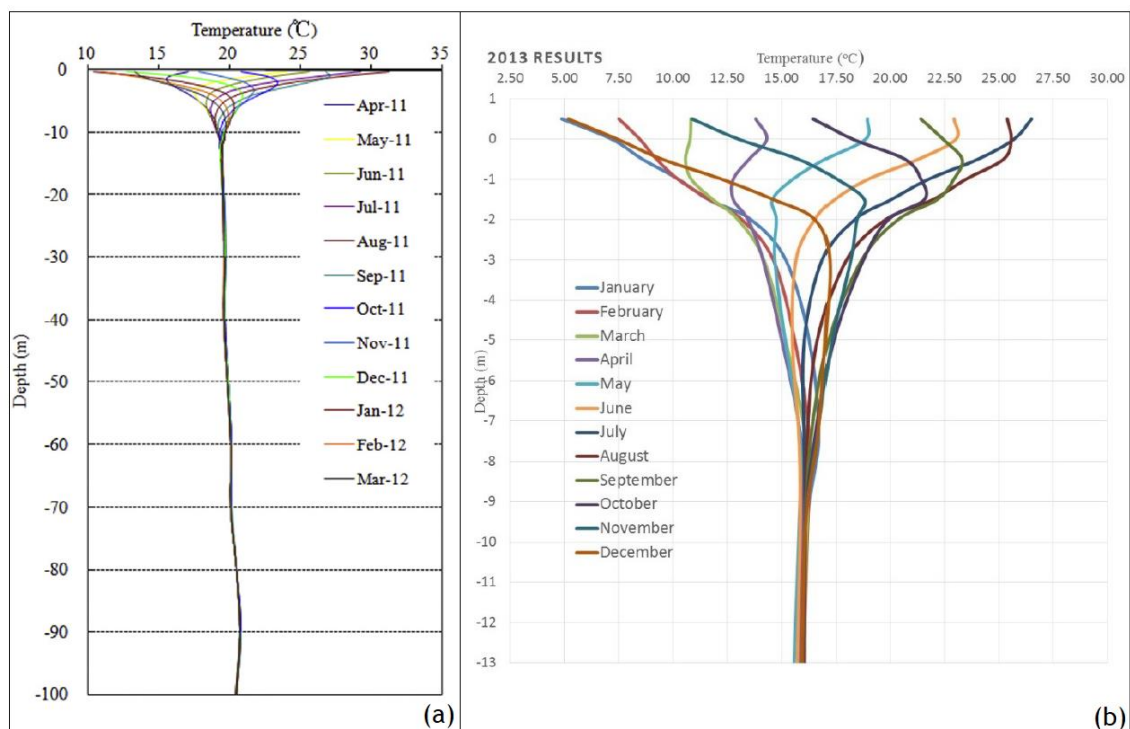


Figura 3.1 - Variação da temperatura do solo em relação à profundidade: (a) região de Chongqing, China (2013). (b) região de Maslak, Turquia (2011-2012) (Adaptada de Zhou, 2016 e Aydin, 2015), respetivamente.

Pode-se verificar e comprovar que, como referido anteriormente, a baixas profundidades, a temperatura do solo varia com o tempo e a mudança sazonal é óbvia. Ao invés, observa-se que, a partir dos 7,5 m de profundidade ao longo do ano a temperatura tende a permanecer aproximadamente constante, em virtude da mitigação das influências das trocas de calor entre o subsolo e o ambiente externo. No período de verão, correspondente à zona central do gráfico, as camadas do solo mais profundas apresentam temperaturas inferiores às verificadas nas camadas menos profundas e à temperatura exterior. Contrariamente, no período de Inverno, representado nas extremidades do gráfico, a temperatura do solo nas camadas mais afastadas da superfície apresenta temperaturas superiores relativamente às camadas mais superficiais e

à temperatura exterior. Por esta razão, o solo pode ser utilizado, por exemplo, na climatização de espaços ou estufas agrícolas, quer seja para aquecimento quer para arrefecimento. É, ainda, é possível comprovar que a amplitude térmica vai-se reduzindo com a profundidade.

3.1.2. Propriedades térmicas do solo

As propriedades térmicas do solo são um dos principais fatores que determinam os processos de troca de massa e energia que ocorrem na Terra. A determinação destas e a sua variação espacial é, portanto, um fator importante na compreensão desses processos em todas as escalas. O conhecimento destas propriedades tem consequências práticas significativas, podendo ser utilizado para a avaliação de condições ótimas para o crescimento de plantas e para o controlo da humidade do solo ou até na avaliação da utilização do solo enquanto fonte térmica (Usowicza et al., 2017).

O regime térmico e o fluxo de calor no solo dependem da quantidade de energia que chega à superfície, do calor acumulado no solo e das propriedades térmicas do solo. A quantidade de calor no solo, bem como a sua transmissão, também é afetada pelas condições climatéricas gerais, topografia, hora do dia, clima e características da superfície ativa onde ocorrem (por exemplo, cobertura devido à existência de vegetação).

A energia que entra e o calor acumulado no solo mudar com rapidez e aleatoriamente, em parte devido à natureza do vento e da cobertura de nuvens. Por outro lado, as propriedades térmicas do solo dependem de propriedades físicas bem definidas e do estado do solo, e podem ser consideradas semi-estáveis (Lehnert, 2015). As propriedades térmicas locais do solo são determinadas pela sua composição mineral, distribuição granulométrica, teor de matéria orgânica, densidade da fração sólida, teor de água e temperatura, (Bachmann, 2001) e (Walczak, 1994).

As propriedades térmicas relacionadas com o solo são assim enumeradas, condutibilidade térmica, resistividade térmica, capacidade térmica (calor específico e calor específico volumétrico) e difusividade térmica.

Condutibilidade térmica

Uma propriedade chave para aplicações geotérmicas é a condutibilidade térmica do solo, que governa o processo de transferência de calor no solo. Esta não é determinada apenas pelas propriedades físicas intrínsecas de cada constituinte do solo, mas é afetada pela sua fração volúmica (Dong et al., 2015). Os principais fatores que influenciam a condutibilidade térmica do solo incluem o grau de saturação de água, densidade de matéria seca, mineralogia do solo, granulometria, entre outros (Farouki, 1981) e (Johansen, 1975).

De entre os fatores apresentados anteriormente, o grau de saturação do solo possui um impacto decisivo sobre a sua condutibilidade térmica. De notar que a transferência de calor no solo ocorre principalmente através de pontos de contacto, isto é, contacto físico entre partículas sólidas do solo, particularmente quando o solo está seco. Neste estado, o solo apresenta uma condutibilidade térmica mais reduzida do que quando o solo está húmido pois, os espaços porosos encontram-se ocupados por ar. O número de pontos de contato é o fator dominante nesse cenário. Além disso, se os grãos sólidos são cimentados por argila ou outros ligantes, a condutibilidade térmica do solo é significativamente melhorada (Yu, 2016).

Podem ocorrer várias mudanças na estrutura do solo naturalmente. Por exemplo, ciclos de secagem e humificação causam expansão e compactação, respetivamente. Pelo que a estrutura do solo é fundamentalmente alterada, resultando em uma conseqüente variação da condutibilidade térmica do solo. Os processos de congelamento e evaporação também levam a alterações na composição e na estrutura dos solos, e afetam a condutibilidade térmica do solo (Overduin, 2006) (Smits, 2010). Na Tabela 3.1 são apresentados alguns valores típicos de condutibilidade térmica para alguns tipos de solos, minerais e outros constituintes que podem ocupar os espaços porosos. Pode-se verificar que em qualquer tipo de solo, dos que são apresentados, quando se encontra saturado tem um valor de condutibilidade térmica superior aos outros estados, onde a argila/silte saturada se destaca. Em relação aos minerais, o quartzo é o que apresenta o valor superior, nos outros constituintes é o gelo que tem uma maior condutibilidade térmica.

Tabela 3.1 - Condutibilidade térmica de alguns tipos de solos, minerais e outros constituintes. Adaptado de McCorry & Jones (2011)⁽¹⁾, segundo a norma alemã VDI 4640, Banks (2008)⁽²⁾ e Hillel (1982)⁽³⁾.

		Condutibilidade térmica [W/mK]	
		Gama de valores	
TIPOS DE SOLO	Argila/silt e	Seca	0,4 - 1,0 ⁽¹⁾
		Saturada	1,1 - 3,1 ⁽¹⁾
	Areia	Seca	0,3 - 0,9 ⁽¹⁾
		Húmida	1,0 - 1,9 ⁽¹⁾
		Saturada	2,0 - 3,0 ⁽¹⁾
	Seixo	Seco	0,4 - 0,9 ⁽¹⁾
Saturado		1,6 - 2,5 ⁽¹⁾	
MINERAIS	Mica	2,0 - 2,3 ⁽²⁾	
	Quartzo	7,7 ⁽²⁾	
	Calcite	3,6 ⁽²⁾	
	Feldspato potássicos	2,3 - 2,5 ⁽²⁾	
	Plagioclase	1,5 - 2,3 ⁽²⁾	

OUTROS CONSTITUENTES	Ar _{@10 °C}	0,025 ⁽³⁾
	Água _{@10 °C}	0,57 ⁽³⁾
	Gelo _{@0 °C}	2,2 ⁽³⁾

Resistividade térmica

Outra propriedade térmica do solo é a resistividade térmica que, conforme Singh & Devid (2000), representa uma medida de resistência oferecida pelo solo à passagem do calor por ele próprio, revelando-se assim o inverso da condutibilidade térmica, que deste modo se expressa em mK/W. Esta propriedade é outro parâmetro fundamental na avaliação da transferência de calor pelo solo.

Tendo em conta que as propriedades apresentadas anteriormente são o inverso uma da outra, é correto dizer que os fatores que influenciam a variação da condutibilidade térmica são, de igual modo, os fatores que se encontram associados às alterações na resistividade térmica do solo, sendo que, de forma inversa no seu valor. De entre esses fatores, segundo Cai et al. (2015), o grau de saturação - quantidade de água no solo - é o fator que mais influencia esta propriedade térmica.

Capacidade térmica

A capacidade térmica é outra das propriedades térmicas do solo. Esta define-se como a quantidade de calor necessária para que um determinado corpo aumente a sua temperatura de um Kelvin (ou grau Celsius), expressando-se assim em J/K. Esta propriedade define a capacidade do solo armazenar calor e controla as variações da sua temperatura (Alnefaie & Abu-Hamdeh, 2013).

Do mesmo modo que as propriedades expostas anteriormente, mas agora associados à capacidade térmica, existem diversos fatores dos quais esta depende, e podem ser divididos basicamente em dois grupos. O primeiro grupo reúne os fatores alusivos ao próprio solo, incluindo a matéria orgânica contida no solo e a sua composição mineralógica. No que diz respeito ao segundo grupo, este reúne os fatores que podem ser influenciados de alguma alteração provinda do exterior, tal como, a massa específica e o grau da saturação. Do mesmo modo que as propriedades analisadas anteriormente, este último detém uma maior influencia na capacidade térmica dos solos (Alnefaie & Abu-Hamdeh, 2013).

De forma a caracterizar a capacidade de armazenamento de energia térmica do solo surgem, através da capacidade térmica e da massa específica, duas propriedades que a caracterizam, nomeadamente o calor específico e o calor específico volumétrico.

Calor específico

O calor específico é definido como a quantidade de calor necessária para aumentar um Kelvin (ou grau Celsius), de um quilograma de substância, expressando-se assim em J/kgK.

Tendo em conta os fatores apresentados anteriormente, apresenta-se na Tabela 3.2 a gama de valores típicos, reunidos da literatura, do calor específico de diferentes tipos de solos, minerais e outros constituintes que podem ocupar os espaços porosos. Através dos dados apresentados é possível verificar-se o efeito do grau de saturação no calor específico em três tipos de solo (argila/silte, areia e seixo). Como se pode verificar, os solos argilosos/siltosos e os arenosos, quando saturados, apresentam um calor específico mais elevado. Sendo que, na generalidade dos casos, os solos arenosos apresentam maiores quantidades de quartzo na sua composição mineralógica. Uma vez que este mineral apresenta um calor específico mais reduzido que a maioria dos minerais, os solos argilosos poderão apresentar um calor específico mais elevado em comparação aos solos arenosos.

Tabela 3.2 - Calor específico de alguns tipos de solos, minerais e outros constituintes. Adaptado de McCorry & Jones (2011)⁽¹⁾, segundo a norma alemã VDI 4640, Rees et al. (2000)⁽²⁾ e Farouki (1981)⁽³⁾.

		Calor específico [J/kgK]	
		Gama de valores	
TIPOS DE SOLO	Argila/silte	Seca	800 - 833 ⁽¹⁾
		Saturada	1000 - 1273 ⁽¹⁾
	Areia	Seca	722 - 727 ⁽¹⁾
		Húmida	842 - 1000 ⁽¹⁾
		Saturada	1158 - 1217 ⁽¹⁾
	Seixo	Seco	722 - 727 ⁽¹⁾
Saturado		1130 - 1158 ⁽¹⁾	
MINERAIS	Moscovite		870 ⁽²⁾
	Quartzo		799 ⁽²⁾
	Biotite		862 ⁽²⁾
OUTROS CONSTITUINTES	Ar _{@20 °C}		1005 ⁽³⁾
	Água _{@10 °C}		4186 ⁽²⁾
	Gelo _{@0 °C}		1884 ⁽²⁾

Calor específico volumétrico

Por outro lado, o calor específico volumétrico é definido como a quantidade de calor necessário para aumentar um Kelvin (ou grau Celsius), de um metro cúbico de substância, expressando-se assim em $\text{kJ/m}^3\text{K}$. Esta propriedade é obtida através do produto entre o calor específico e a massa específica.

A Tabela 3.3 apresenta a gama de valores típicos do calor específico volumétrico de diferentes tipos de solo e minerais. Dado que esta propriedade depende de dois parâmetros referidos anteriormente - calor específico e massa específica - pode-se observar que os valores são aproximadamente idênticos tendo em conta os tipos de solos ponderados. Hillel (1982) refere que o calor específico volumétrico depende do tipo de solo, da massa específica e do grau de saturação do solo, facto comprovado com os dados apresentados.

Tabela 3.3 - Calor específico volumétrico de alguns tipos de solo e minerais. Adaptado de McCorry & Jones (2011)⁽¹⁾, segundo a norma alemã VDI 4640, e Banks (2008)⁽²⁾.

		Calor específico volumétrico [$\text{kJ/m}^3\text{K}$]	
		Gama de valores	
TIPOS DE SOLO	Argila/silte	Seca	1500 - 1600 ⁽¹⁾
		Saturada	2000 - 2800 ⁽¹⁾
	Areia	Seca	1300 - 1600 ⁽¹⁾
		Húmida	1600 - 2200 ⁽¹⁾
		Saturada	2200 - 2800 ⁽¹⁾
	Seixo	Seco	1300 - 1600 ⁽¹⁾
Saturado		2200 - 2600 ⁽¹⁾	
MINERAIS	Mica	2000- 2300 ⁽²⁾	
	Quartzo	1900 - 2000 ⁽²⁾	
	Calcite	2240 ⁽²⁾	
	Feldspato potássicos	1600 - 1800 ⁽²⁾	
	Plagióclase	1640 - 2210 ⁽²⁾	

Difusidade térmica

Lehnert (2014) define a difusidade térmica como o quociente entre a condutibilidade térmica e o produto entre o calor específico e a massa específica, sendo expressa em m^2/s . Conforme Brandl (2006), esta propriedade térmica diz respeito à velocidade de propagação da temperatura no solo e à sua profundidade.

Segundo Farouki (1981), os solos que apresentam um valor de difusividade térmica elevado têm tendência a variações mais significativas e mais rápidas da sua temperatura. Pelo que, é correto

afirmar o conhecimento da difusidade térmica do solo revela-se crucial na compreensão do comportamento do fluxo de calor através do mesmo.

Também a difusidade térmica é influenciada por variados fatores, dos quais o grau de saturação e a composição mineralógica do solo.

Na Tabela 3.4 é apresentada a gama de valores típicos de difusidade de diferentes tipos de solo e minerais. Verifica-se que, os solos arenosos exibem valores de difusidade térmica superiores aos apresentados pelos restantes solos, facto que pode ser justificado pelo que Abu-Hamdeh (2003) refere. Segundo este, a composição mineralógica do solo pode influenciar o comportamento desta propriedade. Assim, pelo que já foi referido anteriormente - na generalidade dos casos os solos arenosos apresentam maiores quantidades de quartzo - serve de explicação para a razão desses valores.

Em relação à influência do grau de saturação do solo nesta propriedade, pode ser explicada devido à mudança de estado físico da água - líquido para sólido - que favorece o aumento da difusidade térmica do solo, devido ao facto do gelo apresentar uma elevada condutibilidade térmica e um valor reduzido de calor específico em comparação com a água no estado líquido, segundo Farouki (1981).

Os dados apresentados na Tabela 3.4 foram obtidos através do quociente entre os valores de condutibilidade térmica e calor específico volumétrico apresentados na Tabela 3.1 e Tabela 3.3

Tabela 3.4 - Difusividade térmica de alguns tipos de solo e minerais. Adaptado de McCorry & Jones (2011)⁽¹⁾, segundo a norma alemã VDI 4640, e Banks (2008)⁽²⁾.

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

3.2. Permutadores de calor ar-solo

A área da climatização tem sido alvo de várias pesquisas e estudos no que se refere à investigação de novos métodos alternativos aos métodos tradicionais. Assim, surgiram vários métodos alternativos de aquecimento e arrefecimento, entre eles os permutadores de calor ar-solo, que podem ser empregues na climatização de edifícios, estufas agrícolas, equipamentos eletrónicos (armário de telecomunicações), processos industriais, entre outras aplicações. A necessidade de novos métodos advém do atual elevado consumo energético de que a climatização é responsável e o impacto que este acarreta para o ambiente.

Os sistemas de climatização que utilizam os permutadores de calor ar-solo têm sido alvo de inúmeras pesquisas. Após os estudos preliminares que superaram as principais dificuldades no início da implementação destes sistemas, atualmente com a quantidade e qualidade dos conhecimentos disponíveis sobre esta forma de climatização, os permutadores de calor ar-solo, são considerados uma tecnologia com elevado potencial para atenuação do consumo de energia relativos à climatização.

Segundo Soni (2016), a combinação destes sistemas com outras tecnologias, sejam estas passivas ou ativas, e que tenham a mesma ou outras finalidades, revela ser uma possibilidade distinta da sua utilização, denominando esta combinação como sistemas híbridos. A associação de outras tecnologias ao permutador de calor ar-solo podem ter diferentes configurações de implementação. A acoplação de outra tecnologia pode ser realizada na zona de admissão de ar ou à sua saída, de modo a melhorar o potencial de arrefecimento ou aquecimento.

A par dos benefícios térmicos associados a esta estratégia, esta ocupa um lugar relevante na conservação de energia e, por sua vez, na atenuação do seu impacto no ecossistema, através da redução das emissões de gases poluentes.

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

Os permutadores de calor ar-solo, ou, segundo a terminologia inglesa, Earth to Air Heat Exchanger (EAHE), são sistemas passivos para aproveitar a energia acumulada no solo, sendo esta tecnologia capaz de utilizar o subsolo como fonte quente ou fonte fria. Como já foi referido anteriormente, o solo tem características muito particulares, visto que mantém um ambiente térmico praticamente estável ao longo do ano, mesmo nas suas camadas menos profundas, consequência da sua elevada inércia térmica. Deste modo, o solo, em relação à temperatura do ar exterior, apresenta no Verão temperaturas mais baixas e no Inverno o inverso, ou seja, apresenta temperaturas mais elevadas do que a temperatura ambiente. Esta característica justifica a razão pela qual estes sistemas são utilizados para climatização.

Segundo Khabbaz (2016) e Manjul & Bartaria (2016) de modo a possibilitar que o sistema funcione tanto para arrefecimento como para aquecimento, deve-se utilizar uma ou mais tubagens com comprimentos na ordem dos 20 m a 70 m, e, geralmente instalados a uma profundidade entre 2,5 e 3 m.

As extremidades das tubagens apresentam finalidades diferentes, visto que o ar circula apenas num sentido. Uma das extremidades tem como função permitir a entrada de ar, enquanto a outra extremidade possibilita a sua saída, libertando o ar para o local que é necessário climatizar. À medida que o ar percorre estas tubagens, ocorre a transferência de calor por convecção entre a superfície interna do tubo e o ar, conseqüentemente, este pode aquecer ou arrefecer conforme a estação do ano. Visto que a temperatura dos tubos é semelhante à temperatura do solo, que se encontra em contacto com os mesmos, é perceptível que ocorre uma transferência de calor por condução entre estes dois materiais. Na generalidade dos casos para se proceder à circulação do ar no interior das tubagens recorre-se a um sistema de ventilação mecânica para insuflar o ar exterior, garantindo um caudal superior e constante comparativamente ao obtido através de ventilação natural.

Fruto dos estudos realizados, um pouco em todo o mundo, surgiram diversas configurações de sistemas de permutadores de calor ar-solo. Apesar disso, foram definidas duas principais configurações, baseadas no tipo de circuito, e assim denominados sistemas de circuito aberto e sistemas de circuito fechado, (Sanner, 2004).

Os permutadores de calor ar-solo de circuito aberto, ilustrados na Figura 3.2, utilizam o ar proveniente do exterior para obter a climatização do espaço. Este sistema de ventilação mecânica força o ar exterior a circular no interior das tubagens, de modo a que este ganhe ou liberte calor, por sua vez este ar é conduzido diretamente para o espaço que se pretende climatizar. Geralmente os permutadores com esta configuração são instalados no solo numa posição horizontal. Uma das vantagens, logo evidente, é a constante renovação do ar no espaço climatizado.

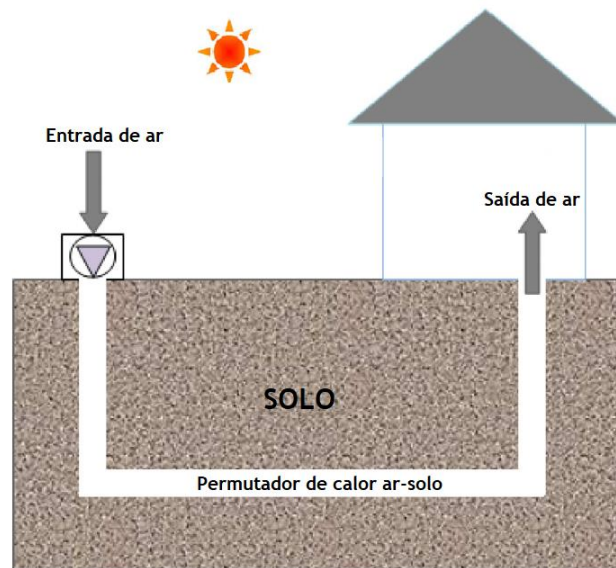


Figura 3.2 - Esquema ilustrativo de um permutador de calor ar-solo em circuito aberto (Adaptado de Kausahal, 2015).

Em relação aos permutadores de calor ar-solo de circuito fechado, ilustrado na Figura 3.3, a climatização do espaço é realizada com o ar proveniente do interior do espaço a climatizar, através da recirculação do mesmo. Esta recirculação do ar faz com que este tipo de configurações sejam mais eficientes do que os de circuito aberto, uma vez que, o ar que entra no permutador já se encontra a uma temperatura mais próxima da que é desejada, visto que, o ar só está em convivência com o permutados e o local a ser climatizado (Do et al., 2015).

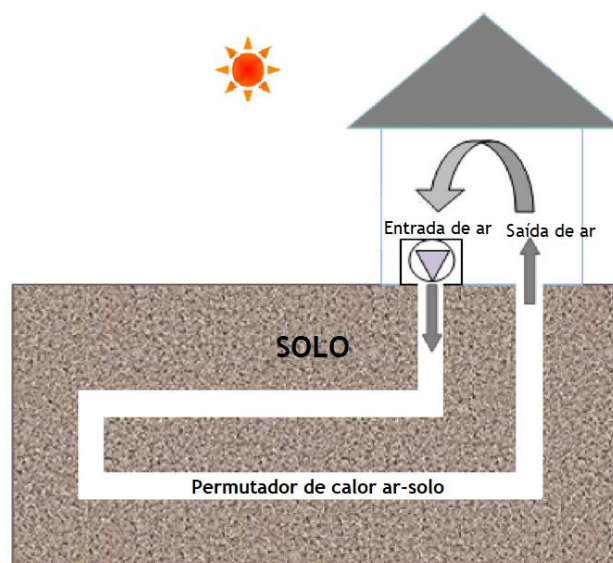


Figura 3.3 - Esquema ilustrativo de um permutador de calor ar-solo em circuito fechado (Adaptado de Kausahal, 2015).

Este tipo de configuração foi decaindo em desuso ao longo do tempo visto a não atender aos requisitos impostos pela legislação relativa à qualidade do ar interior (AQI) em edifícios de serviço, residências, entre outros. Esta impõe valores mínimos da taxa de renovação de ar por hora no seu interior (Hollmuller & Lachal, 2001).

Os sistemas de circuito fechado possuem diversas configurações de modo a aproveitar o máximo de transferência de calor. Estas podem ser agrupadas consoante a sua disposição no subsolo, nomeadamente na horizontal (Figura 3.4) ou na vertical (figura 3.5). A decisão entre o tipo de disposição que se deve/pode instalar não depende só do espaço disponível como, também, dos custos associados à implementação dos sistemas, sobretudo relativamente às perfurações e escavações. Estas podem variar consoante a composição do solo, podendo ainda ser um fator determinante na possibilidade ou impossibilidade da implementação de permutadores de calor ar-solo verticais (Florides & Kalogirou, 2007 e Dasare & Saha, 2015).

Em relação aos permutadores de calor ar-solo de circuito fechado e com configuração horizontal, estes possuem ainda formatos diferentes, dependendo principalmente do tipo de solo e da área de solo que está sujeita à incidência de radiação solar. Estes sistemas necessitam de uma significativa área de terreno e são instalados a uma profundidade média situada entre os dois e os três metros, estando, deste modo, sujeitos a mais alterações de temperatura sazonais, (Lee et al., 2015).

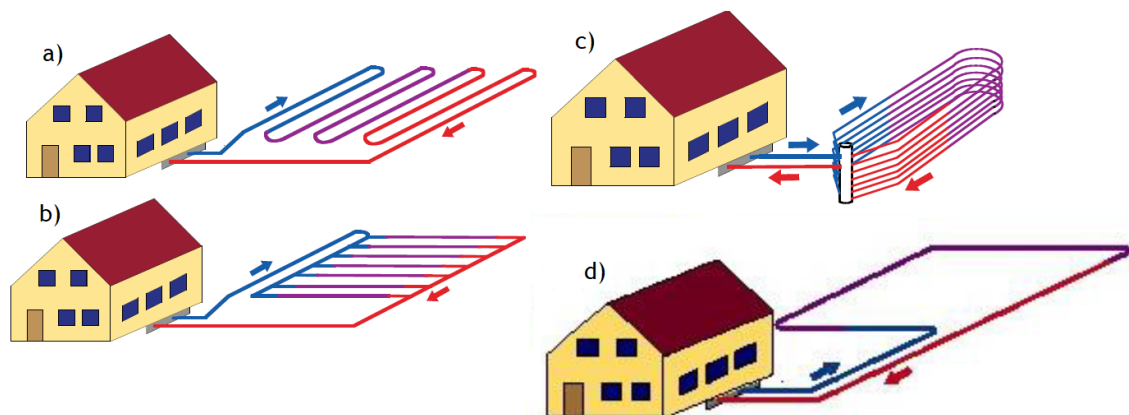


Figura 3.4 - Esquemas das diferentes configurações dos permutadores de calor ar-solo, em circuito fechado horizontais: a) em série; b) em paralelo; c) em andares; d) simples (Adaptado de Sanner, 2004).

No caso dos permutadores de calor ar-solo de circuito fechado e com configuração vertical, estes ocupam menores áreas de solo, mas por sua vez permitem uma grande área de contacto do permutador com o solo circulante, maximizando, assim, a captação ou dissipação de calor. Outra característica deste tipo de configuração é a redução do tempo de transição do ar presente na base do permutador para o espaço a climatizar, devido ao facto do tubo de retorno se encontrar na vertical, minimizando assim o “curto-circuito térmico” do sistema (REHAU,

2013). Esta configuração, segundo a literatura, está mais direcionada para uso em bombas de calor geotérmicas.

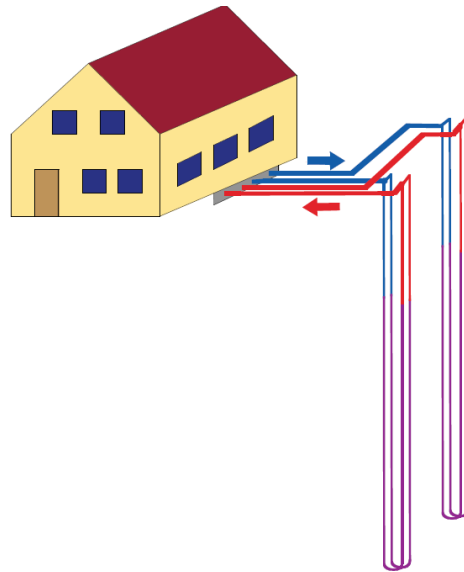


Figura 3.5 - Esquema da configuração dos permutadores de calor ar-solo, em circuito fechado vertical. (Adaptado de Sanner, 2004).

Devido às especificações das perfurações associadas a este tipo de sistemas, os custos associados aos mesmos, são, geralmente, bastante superiores em comparação aos sistemas horizontais. De salientar que os furos realizados para a instalação destes sistemas necessitam de um diâmetro, no mínimo, com o dobro do diâmetro dos tubos, de modo a permitir a passagem das tubagens de ida e retorno.

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

O bom desempenho destes sistemas é influenciado por diversos parâmetros e também por um correto dimensionamento. Esses parâmetros não estão apenas diretamente relacionados com a construção dos permutadores, mas também são influenciados por parâmetros externos que podem interferir no seu desempenho. Seguidamente são listados e analisados sucintamente os principais fatores influentes no desempenho de permutadores de calor ar-solo, sejam eles de origem construtiva ou externa:

- Material de construção;
- Comprimento da tubagem;
- Diâmetro da tubagem;
- Espaçamento entre tubagens;

- Velocidade do escoamento de ar;
- Profundidades do permutador;
- Tempo de funcionamento do permutador;
- Condutibilidade térmica do solo.

No que se refere ao material de construção, mais propriamente da tubagem, existem diversos materiais possíveis. Na literatura os mais utilizados vão desde de tubos em aço inoxidável ou galvanizado, tubos polipropileno (PP) com revestimento antimicrobiano, cimento, argila, ao policloreto de vinilo (PVC). A escolha do material pode passar pela comparação da condutibilidade térmica que cada um, de modo a permitir uma melhor transferência de calor por condução. Sendo que, segundo alguns autores, como Ahmed et al. (2016) e Misra et al. (2014), este fator pode-se considerar irrelevante, no modo em que se torna insignificante a influência no desempenho térmico destes sistemas.

No âmbito de estudos experimentais encontrados na literatura, os permutadores de calor em PVC apresentam uma maior empregabilidade, mesmo que isso signifique uma ligeira redução no desempenho térmico comparativamente a outros materiais com maior condutibilidade térmica. A preferência pela utilização do PVC, segundo Sousa (2014), é justificada pelo seu baixo custo de aquisição, simplicidade de montagem, resistência e durabilidade.

Em relação ao comprimento da tubagem, este parâmetro é o indicador da área de superfície exterior da tubagem que está permanentemente em contacto direto com o solo circundante. Deste modo, é de fácil perceção que quanto maior for o percurso de permuta de calor maior será essa área, e por sua vez maior quantidade de calor será transferido entre o solo e o ar, considerando um diâmetro constante. Todavia, o comprimento da tubagem está sempre dependente do investimento económico e das restrições relacionadas com a área de terreno livre.

Quanto ao diâmetro da tubagem, a utilização de um diâmetro menor significa que o centro do tubo estará mais próximo do solo envolvente, comparativamente aos tubos de diâmetro superior. Esta particularidade resulta numa transferência de calor mais eficaz entre o ar e o solo, ou seja, com diâmetros menores a porção de ar circulante no interior da tubagem, principalmente a que se encontra mais distante do centro do tubo, tende a ficar mais próxima do mesmo, atingindo assim uma temperatura mais próxima da temperatura do solo circundante.

Aparentemente, a solução com melhor desempenho térmico seria a combinação de tubos de grande comprimento com diâmetros reduzidos. No entanto, esta não é viável pois, em contrapartida, contribui para o aumento da queda de pressão ao longo do sistema. Uma solução para esse problema, segundo De Paepe & Janssens (2003), passa por aumentar o número de tubos enterrados, ou seja, repartir o comprimento inicial considerado.

Após a análise deste parâmetro surge outro relacionado com as tubagens, o espaçamento adequado entre estas, de modo a evitar interferência na transferência de calor. Para evitar este fato, é recomendado que a distância mínima entre tubos adjacentes seja cerca de duas vezes o diâmetro externo do tubo utilizado (De Paepe & Janssens, 2003). No dimensionamento deste parâmetro, tal como nos outros, é necessário ter em conta a área disponível para a instalação deste sistema. Neste caso, é importante ponderar o espaçamento entre o local de instalação do permutador e a localização de infraestruturas na vizinhança. Uma vez que a troca de calor entre estas e o solo pode influenciar a temperatura do mesmo e, conseqüentemente, interferir no desempenho do permutador caso seja instalado muito perto de infraestruturas.

Em relação à velocidade do escoamento de ar, este está diretamente relacionado com o tempo que o ar se mantém em contacto com a superfície interna das tubagens. Assim sendo, de modo a aumentar o tempo que o ar se encontra em contacto com as tubagens enterradas, menor terá de ser a velocidade de escoamento, ocorrendo assim uma maior troca de calor entre o ar e o solo e uma maior estabilidade na temperatura do ar, em comparação a velocidades mais elevadas.

No que diz respeito à profundidade dos permutadores, como já foi visto na secção 3.2.1, à medida que a profundidade aumenta a temperatura do solo tende a manter-se relativamente constante ao longo do ano, não sofrendo assim alterações provenientes do exterior, proporcionando um ambiente térmico mais estável e favorável à utilização de permutadores de calor ar-solo. Assim, conclui-se que devem ser instalados tão profundamente quanto possível, tendo sempre em conta que estas manobras de escavação/perfuração são de difícil execução e de elevados custos operacionais.

Relativamente ao tempo de funcionamento do permutador, pode ser considerado um parâmetro que influencia o desempenho térmico do permutador, do jeito que uma utilização muito prolongada do permutador de calor pode proporcionar uma alteração mais acentuada da temperatura do solo e, conseqüentemente, uma maior saturação térmica do mesmo. Este fenómeno, segundo Mathur et al. (2015), é definido pela convergência do valor da temperatura do solo adjacente às tubagens, ao valor da temperatura exterior. A mitigação deste fenómeno pode ser obtida com o aumento do comprimento das tubagens e do espaçamento entre cada tubo, caso a configuração escolhida contenha mais do que um tubo instalado paralelamente. Mais uma vez a área de terreno disponível e os custos adicionais a estas alterações são um inconveniente ao redimensionamento do sistema.

Relacionado com o fenómeno referido anteriormente surge, assim, a condutibilidade térmica do solo. Através desta propriedade térmica é possível conhecer até que ponto um solo é bom ou mau condutor de calor. Como referido no capítulo 3.2.2, os solos com maior grau de saturação de água apresentam gamas de condutibilidade térmica maiores, que por sua vez beneficiam a transferência de calor por condução. Deste modo, de forma a obter o melhor

desempenho térmico possível, a implementação dos permutadores em solos com elevada condutibilidade térmica é sem dúvida a melhor opção.

Tendo em conta o que foi referido anteriormente, o dimensionamento, projeto e implementação de permutadores de calor ar-solo necessita de um estudo preliminar em variadas áreas. Começando pela análise do solo, nomeadamente a sua estrutura e as suas propriedades térmicas, passando pela geometria do permutador, pelo tipo e quantidade de material necessário, bem como aspetos técnicos e económicos. Deve-se ter tudo em conta quando se pensa na implementação de um sistema deste género.

3.2.3. Análise energética

Os permutadores de calor ar-solo, como referido anteriormente, surgiram com a finalidade de reduzir os consumos na área da climatização. Este sistema, devido à utilização de apenas equipamentos auxiliares de ventilação, apresenta custos de operação reduzidos. De modo a possibilitar a realização de uma análise energética desta tecnologia, apresentam-se seguidamente as equações mais empregues na literatura, que permitem o cálculo da potência de aquecimento e arrefecimento, e o do coeficiente de desempenho (*COP - Coefficient of Performance*) destes sistemas.

As potências de aquecimento e de arrefecimento são calculadas em analogia com a época do ano. O seu valor pode ser obtido pelas equações (3.1) e (3.2), respetivamente.

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

e

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

Onde:

- \dot{Q}_h e \dot{Q}_c - Potência de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, [kW];
- $T_{entrada}$ e $T_{saída}$ - Temperatura à entrada e à saída do permutador, respetivamente, [°C];
- \dot{m}_{ar} - Caudal mássico do ar, [kg/s];
- $c_{p,ar}$ - Calor específico do ar a pressão constante, [kJ/(kg K)].

Para averiguar o valor do calor específico (c_p), há que ter em conta a temperatura média (T_m) do ar:

$$T_m = \frac{T_{entrada} + T_{saída}}{2} \quad (3.3)$$

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

$$\dot{m}_{ar} = \rho_{ar} \frac{\pi d^2}{4} v_{ar} \quad (3.4)$$

Onde:

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

Em relação ao coeficiente de desempenho (COP), este representa a razão entre a potência térmica do permutador e a potência elétrica que o sistema de ventilação utiliza de modo a gerar o caudal de ar necessário. Este índice é inerente à análise energética dos permutadores de calor, permitindo conhecer o quão o sistema é eficiente. Tal como acontece com as potências referidas anteriormente, este parâmetro de análise também está em conformidade com a época do ano, obtendo assim o coeficiente de desempenho do sistema para aquecimento ou para arrefecimento. As equações que permitem calcular este parâmetro apresentem-se de seguida:

$$COP_h = \frac{\dot{Q}_h}{\dot{W}} \quad (3.5)$$

Ou

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} \quad (3.6)$$

Onde:

- COP_h e COP_c - Coeficiente de desempenho de aquecimento e arrefecimento, respetivamente;
- \dot{W} - Potência elétrica do sistema de ventilação, [W].

3.3. Aplicações de permutadores de calor

Neste subcapítulo que se segue são apresentadas algumas aplicações de permutadores de calor ar-solo, entre as quais algumas em Portugal. A informação apresentada será mais focada nos aspetos técnicos destes sistemas e serão ilustrados, sempre que possível, os esquemas representativos do princípio de funcionamento.

3.3.1. Climatização de uma estufa agrícola

Um dos estudos apresentados na secção 1.3.1, referente ao estudo levado a cabo por Mongkon et al. (2013) é agora analisado do ponto de vista dos aspetos técnicos e implementação deste sistema.

A estufa foi implementada em Chiang Mai, norte da Tailândia, e, segundo os autores, foi o primeiro estudo a aplicar um sistema de tubos horizontais subterrâneos para o arrefecimento de uma estufa agrícola, no clima tropical da Tailândia. A estufa, com uma área de 30 m², foi contruída com a finalidade do cultivo de flores, tomates e pimentas. Na cobertura da mesma foi utilizado um plástico transparente de polietileno e foi alinhada na direção norte-sul.

O permutador de calor foi colocado a uma profundidade de 1 m sob uma superfície de vegetação curta, e orientado a norte da estufa (do lado de fora da mesma). De acordo com a análise realizada ao solo concluíram que se tratava de um solo argiloso e com uma condutibilidade térmica de 0,72 [W/(m K)]. As tubagens foram realizadas em ferro com um revestimento antiferrugem e colocados em serie, na horizontal, com espaçamento de 50 cm e paralelamente entre si, perfazendo um total de 6 filas com 6 m de comprimento cada, como se pode verificar na Figura 3.6. O comprimento total dos tubos soterrados é aproximadamente de 38,5 m.

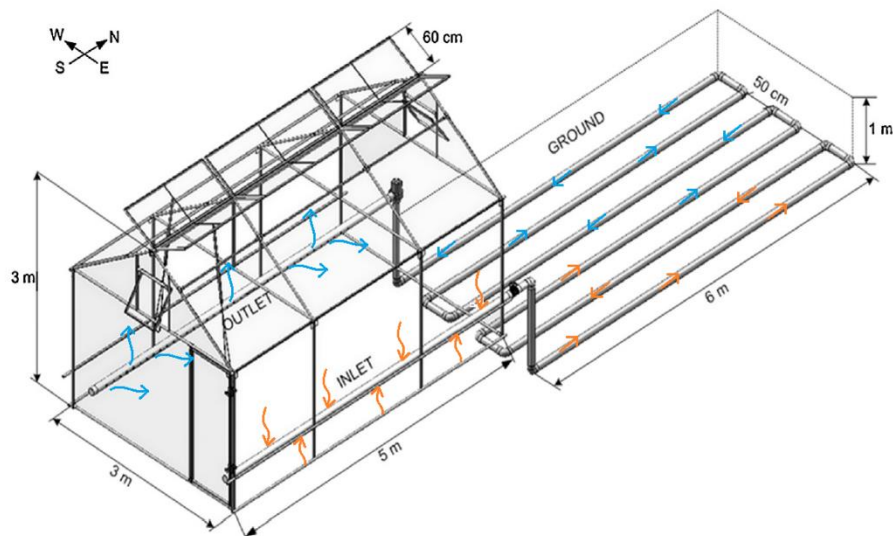


Figura 3.6 - Princípio de funcionamento do permutador de calor ar-solo para aquecimento de uma estufa (Adaptada de Mongkon, 2013).

O sistema de circulação de ar é composto por dois tubos, um a este da estufa, onde o ar é insuflado, e outro a oeste para permitir a redistribuição do ar na estufa. Ambos os tubos foram construídos em PVC com um diâmetro de 8 cm e perfurados ao longo do seu comprimento para permitir a entrada e saída do ar. O fluxo de ar foi controlado recorrendo a um ventilador centrifugo instalado na saída do permutador, permitindo um caudal mássico de 216 kg/h. Na Figura 3.7 é possível visualizar o pormenor da implementação tanto do permutador como da estufa.



Figura 3.7 - Vista exterior da estufa e implementação do permutador de calor ar solo (Mongkon et al., 2013).

As temperaturas do solo a uma profundidade de 1 m foram de aproximadamente 24,5 °C, 28,8 °C e 28,6 °C no Inverno, Verão e monção, respectivamente. Na Figura 3.8 estão representadas as diferenças de temperatura, entre o verão, o inverno e as monções, obtidas no interior da estufa em relação à hora do dia, com a utilização do permutador de calor tanto para arrefecimento como para aquecimento. Com a implementação do permutador de calor ar-solo, verificou-se que antes das 11:00, num dia típico de Inverno, a implementação deste sistema permitiu aumentar a temperatura da estufa em cerca de 5,4 °C. Já num dia típico de Verão, por causa da alta radiação solar, a temperatura da estufa era claramente maior do que a do ambiente, porém com o permutador em funcionamento possibilitou que a estufa não ultrapassasse os 38,8 °C. Para um dia típico de monções, entre as 11:00 e as 18:00 a temperatura da estufa diminuiu ligeiramente no intervalo de 0 a 1,4 °C. Esta experiência permitiu concluir que o COP do dia típico de Verão foi maior que nos dias de Inverno e de monções, nos quais os valores de COP foram de 3,56, 2,04 e 0,77, respectivamente.

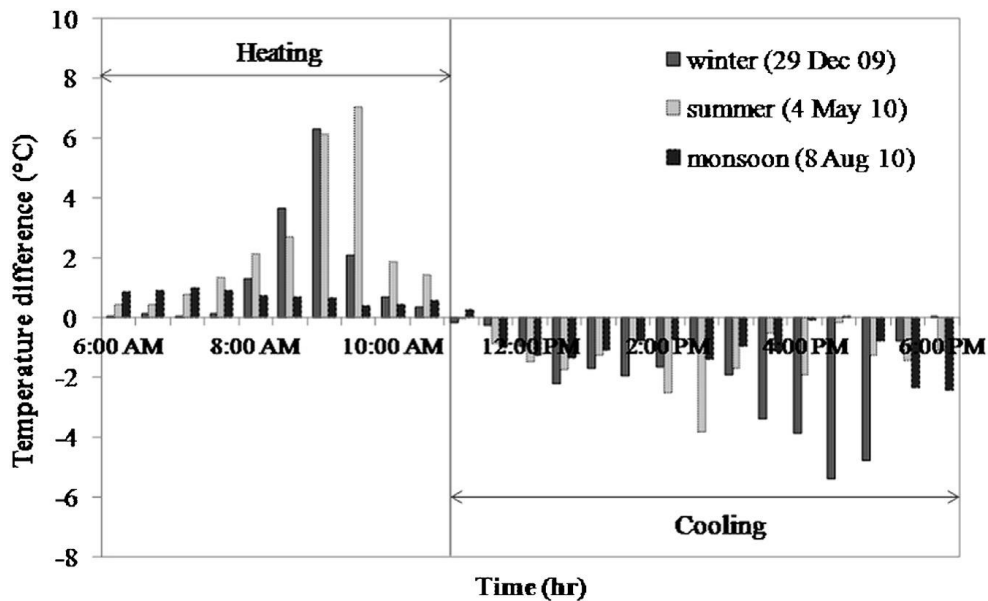


Figura 3.8 - Diferença de temperatura no interior da estufa (Mongkon et al., 2013).

3.3.2. Arrefecimento de um armário de telecomunicação típico FTTC

Outra utilização, também já referenciada no subcapítulo 1.3.1, tem como objetivo proceder ao arrefecimento de um armário de telecomunicação típico FTTC (fiber to the cabinet) recorrendo a um permutador de calor ar-solo, em forma de “T”, que foi desenvolvido por Yuping et al. (2008). O sistema foi instalado nas imediações das instalações da Telecom Itália, em Turim, em julho de 2008.

Como se pode verificar pela Figura 3.9, o sistema é constituído por duas partes, o armário de telecomunicações (parte superior) e o permutador de calor (parte inferior) que são fixados um ao outro recorrendo a parafusos. O permutador é um conjunto de seis tubos construídos numa liga de alumínio e amónio, distribuídos paralelamente e horizontalmente, em formato característico de alhetas, e instalado a 1.5 m de profundidade. O fluxo de ar encontra-se também representado na figura, e é auxiliado por dois ventiladores que direcionam o fluxo de ar quente, produzido pelos diversos dispositivos eletrónicos, para o solo. Seguidamente, o ar arrefecido é de novo reintroduzido para o interior do armário.

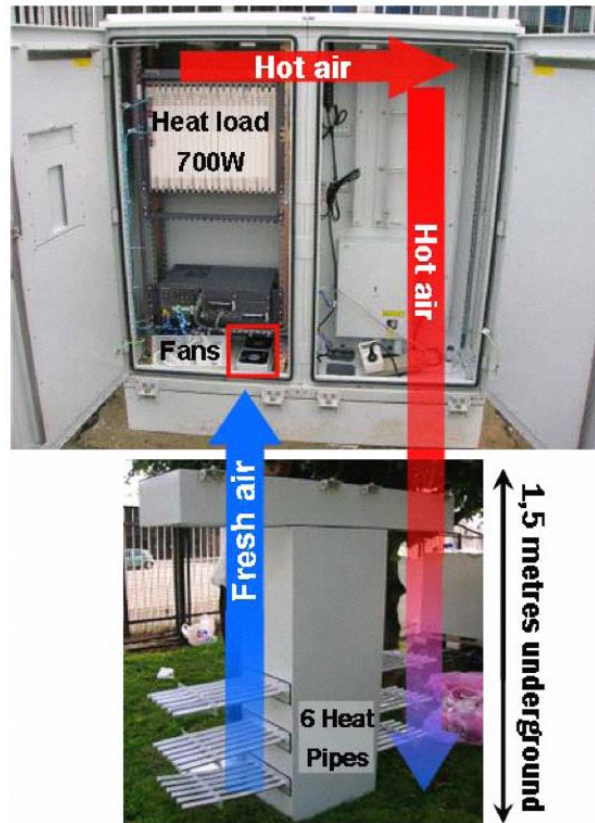


Figura 3.9 - Armário de telecomunicação típico FTTC e o respetivo permutador de calor ar-solo (o permutador encontra-se, ainda, por enterrar) (Yuping et al.,2008).

Durante a utilização deste sistema registaram-se temperaturas exteriores de 30 °C, ainda assim, com a aplicação do permutador de calor, foi possível dissipar metade da carga térmica (700W) do interior do armário. Por sua vez, a temperatura no interior do armário reduziu em aproximadamente 5 °C.

3.3.3. Aplicações em Portugal - Edifício solar XXI

Um exemplo de aplicação, em Portugal, de um permutador de calor ar-solo para efeitos de climatização é o edifício “Solar XXI”. Construído no campus do Lumiar (Lisboa) em 2005, é um edifício multifuncional, constituído por escritórios de trabalho, laboratórios e salas de reuniões, distribuídos por três pisos, sendo que um deles encontra-se semienterrado (INETI, 20015).

O permutador é constituído por um conjunto de 32 tubos (manilhas de cimento) soterrados a 4,6 m de profundidade, dispostos horizontalmente e com um diâmetro de 30 cm. Cada tubo tem um comprimento de 15 m, distância entre o local de admissão de ar e o piso semienterrado, lugar onde o ar entra no edifício. A circulação do ar é realizada com recurso a uma unidade de ventilação de 30 W instalada na saída de cada tubo. Com a implementação desta solução foi possível reduzir a temperatura interior do edifício numa gama entre os 2 e 3 °C (Lopes, 2012).

As Figura 3.10 e Figura 3.11 apresentam o esquema do princípio de funcionamento do permutador de calor ar-solo e o pormenor da instalação das tubagens, respetivamente.

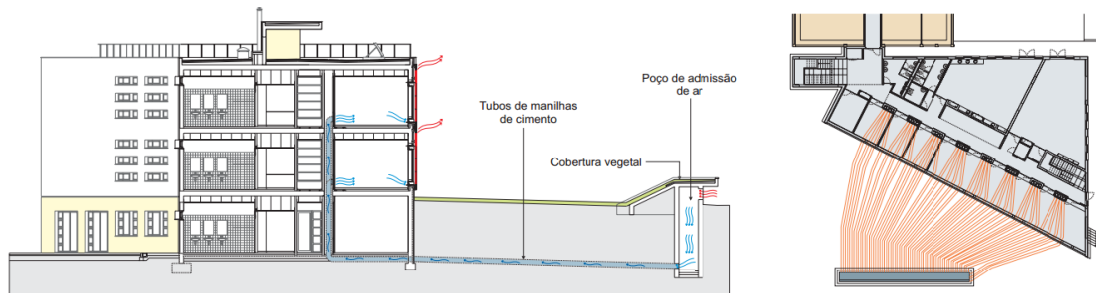


Figura 3.10 - Esquemática do princípio de funcionamento do permutador de calor ar-solo do edifício Solar XXI (Adaptado INETI, 2005).



Figura 3.11 - Pormenor da instalação das tubagens (Adaptado de INETI, 2005).

É importante referir que, para além do permutador de calor ar-solo, este edifício é constituído por mais métodos e soluções passivas que promovem a eficiência energética, tais como:

- Isolamento adequado na parte exterior do edifício;
- Orientação da fachada principal para Sul (maximiza os ganhos solares na estação de Inverno);
- Utilização de painéis fotovoltaicos para produção de energia elétrica.

Em Portugal, este não é caso único no que se refere à utilização de permutadores de calor ar-solo para climatização de edifícios. Existem, pelo menos, mais três edifícios que utilizam esta solução passiva para o arrefecimento do espaço interior aproveitando os benefícios concedidos pelo solo a muito baixa profundidade, são eles:

- Edifício Oásis, situado em Estoi (Faro-Algarve);
- Edifício Borboleta, situado em Barão de S. Miguel (Vila do Bispo-Algarve);
- Edifício Porto Santo, situado na Ilha de Porto Santo (Sítio da Ponta - Arquipélago da Madeira).

3.4. Nota conclusiva

Em suma, no capítulo que agora se encerra abordou-se a temática do arrefecimento e aquecimento por meio de permutadores de calor ar-solo. Primeiramente, apresentou-se o solo como fonte térmica, apontando a capacidade que este possui para armazenar energia geotérmica, bem como a variação da sua temperatura em relação à profundidade e ao tempo. Para uma melhor percepção deste fenómeno foram apresentadas as principais propriedades térmicas do solo e a influência que estas têm na capacidade do solo manter uma temperatura relativamente constante ao longo do ano.

Posteriormente foi explicado o princípio de funcionamento e os tipos de configuração dos permutadores de calor ar-solo, tendo também sido analisados os parâmetros e fatores que mais influenciam o seu desempenho. Foram apresentadas as fórmulas matemáticas que permitem o cálculo da potência térmica e do coeficiente de desempenho (COP) destes sistemas, permitindo assim uma análise energética dos mesmos. Por fim, apresentaram-se algumas aplicações reais destes sistemas, inclusivamente uma relacionada com um armário de telecomunicações, como é o caso de estudo desta dissertação, e outra instalada num edifício em Portugal.

Capítulo 4

4. Materiais e métodos

O capítulo seguinte inicia-se com a exposição dos elementos centrais ensaiados no âmbito deste trabalho, nomeadamente, o permutador de calor ar-solo e o armário de telecomunicações, baseando-se na descrição detalhada das características e especificações técnicas e construtivas de cada unidade experimental. Do mesmo modo, são, depois, apresentadas as especificações e as diferentes finalidades de cada equipamento auxiliar empregue na realização dos ensaios.

Na fase final deste capítulo são apresentados e descritos os estudos experimentais realizados, nomeadamente, a monitorização da temperatura do solo em três locais na cidade da Covilhã e os ensaios realizados com a finalidade de proceder ao arrefecimento do armário de telecomunicações recorrendo à utilização de um permutador de calor ar-solo.

4.1. O armário de telecomunicações

Nesta secção é apresentado o armário de telecomunicações utilizado para a realização dos ensaios, sendo expostas as suas características construtivas e a sua constituição física.

Seguidamente serão abordados os equipamentos usualmente instalados no interior do armário de telecomunicações em questão, tendo como objetivo perceber a sua principal função, a energia térmica dissipada e as temperaturas de funcionamento recomendadas.

Por fim, é explicado o princípio de funcionamento do sistema de arrefecimento original do armário, assim como a descrição e características dos ventiladores nele instalados.

4.1.1. Características do armário

Quanto à sua construção física, este é construído em Aluzinc, com uma espessura de 1mm, uma liga metálica composta por 55% de alumínio, 43,4% de zinco e 1,6% de silicone (Delgado, 2016). Relativamente à estrutura física do armário, este apresenta uma forma paralelepípedica, com as seguintes dimensões: 1480 mm x 644 mm x 644 mm. Na Figura 4.1 está apresentada uma imagem do armário em estudo. O mesmo pode ser dividido em três partes fundamentais, numeradas na Figura 4.1, são elas:

- Zona superior (1): Corresponde à cobertura do armário. Na parte inferior desta existe um espaço que permite a ligação entre ao corpo do armário e a cobertura. Neste local existem dois ventiladores numa posição central, de modo a forçar a circulação de ar do

interior do armário para o exterior. Para permitir a saída do ar para o exterior existem ranhuras em ambas as extremidades inferiores da cobertura. Estas estão localizadas de modo a evitar a entrada de chuva ou outros corpos prejudiciais ao bom funcionamento do armário;

- **Corpo do armário (2):** Esta é a estrutura propriamente dita do armário, zona onde são colocados os equipamentos eletrónicos. Apresenta uma forma paralelepípedica em que a face frontal possui a porta principal e as faces laterais são duas portas removíveis, de modo a facilitar o acesso ao interior do armário. Todas as faces laterais são de parede dupla, 20 mm de espaço livre, de modo a reduzir a transmissão de calor por condução entre o exterior e o interior do armário. As mesmas são pintadas de branco, na superfície exterior, de forma a maximizar a reflexão de radiação solar incidente e, deste modo, reduzir os ganhos térmicos por radiação provenientes do exterior. Ainda na superfície exterior de todas as faces, encontram-se ranhuras ligeiramente inclinadas, na parte superior e inferior das mesmas, de modo a possibilitar a entrada do ar e evitando a entrada de chuva. Na parte inferior da superfície interna das portas referidas, encontram-se instalados filtros de ar, para evitar a entrada de partículas ou corpos estranhos para o interior do armário quando ocorre a circulação de ar, seja por convecção natural ou forçada.
- **Zona inferior (3):** Esta zona é a base do armário de telecomunicações, pedestal (chão falso), com 150 mm de altura. Este apresenta quatro aberturas com tampas amovíveis, uma em cada face lateral, para possibilitar a passagem de cabos ou para outras finalidades necessárias. De salientar que é numa destas aberturas que é realizada a insuflação do ar proveniente do permutador de calor ar-solo.



Figura 4.1 - Armário de telecomunicações ABE_V2. 1) Cobertura do armário; 2) Armário de telecomunicações; 3) Pedestal (chão falso).

Em relação ao espaço útil no interior do armário, existe uma norma decretada pela EIA-310 para quantificar esse espaço. Para medir o espaço útil no interior do armário é utilizada uma unidade padrão denominada de rack [U]. O equivalente de 1 U é 44,45 mm, tendo esta unidade a finalidade de informar a altura disponível para a instalação de equipamentos. De igual modo, a largura dos mesmos é padronizada em 19”, ou seja 482,6 mm. No caso específico do armário em estudo, ABE_V2, este dispõe de 26U (1155,7 mm) para a colocação dos variados equipamentos de telecomunicações.

4.1.2. Equipamentos de telecomunicações no interior do armário

Os equipamentos instalados no interior do armário são da responsabilidade das empresas concessionárias e são selecionados de acordo com as especificações do serviço pretendido. Apesar disso, existem equipamentos tipicamente utilizados nestes armários de modo a satisfazer os serviços de comunicações móveis. Além destes equipamentos específicos, existem outros que são comuns à maioria dos armários, como é o exemplo de quadros elétricos. No caso do armário em estudo, devido ao facto de nem todos os equipamentos serem alimentados com o mesmo tipo de corrente elétrica, este contém dois quadros elétricos, um de corrente alternada (AC) e um de corrente contínua (DC). A utilização de dois quadros tem o intuito de gerir o funcionamento dos equipamentos, bem como protegê-los contra possíveis fenómenos elétricos que os possam danificar.

Como é sabido, em todos os componentes elétricos há geração de calor, sendo em uns mais do que noutros. No caso dos quadros elétricos, a sua dissipação térmica, comparativamente à dos equipamentos de telecomunicações, é desprezável no estudo térmico desta dissertação. Para este estudo, tendo em conta o armário de telecomunicações em questão, foram considerados os equipamentos usualmente instalados no seu interior, pelo que, seguidamente serão abordados esses equipamentos, com principal foco para a energia térmica dissipada e as temperaturas de funcionamento recomendadas.

O equipamento que apresenta maior energia térmica dissipada, cerca de 295 W, é o BBU3900 da Huawei. A instalação deste equipamento só é possível em armários com mais do que 2U, visto que contem 442 mm de largura, 310 mm de profundidade e 86 mm de altura. A função deste é estabelecer o contato entre as estações base de telecomunicações (EBT's) e as unidades de rádio remotas (RRU - Remote Radio Unit), por meio de cabos de fibra ótica. Para isso, esta unidade realiza o processamento da banda base (BBU - Base Band Unit), dos sinais e da temporização da EBT. Em relação à sua alimentação, este é alimentado com corrente contínua, de -48 VDC. Este equipamento admite uma humidade relativa entre os 5% e os 95% e possui duas gamas de temperatura de funcionamento, uma para longos períodos de funcionamento e outra para intervalos de tempo reduzidos. Sendo que para períodos de funcionamento extensos a temperatura pode estar entre os -20 °C e os 50 °C, ao passo que, para temperaturas entre os 50 °C e os 55 °C é recomendado que o mesmo não funcione além de um pequeno intervalo de tempo. De modo a evitar algum problema devido a temperaturas elevadas, este possui ventiladores para o seu arrefecimento (Huawei, 2012) (Delgado, 2016). De salientar que, a caixa dissipadora de calor que se encontra no armário de telecomunicações em estudo, de modo a simular a carga térmica dos equipamentos de telecomunicações, foi construída por Delgado (2016) com base neste equipamento.

Ainda outra possibilidade que pode ser utilizada, ao invés do BBU3900, com a mesma finalidade e com as mesmas funcionalidades é o RBS 6601 da Ericsson. A principal diferença destes dois modelos é a temperatura de funcionamento e a humidade relativa, que, para este caso é, respetivamente, 5 °C a 45 °C e de 5% a 85% (Ericsson, 2010) (Delgado, 2016).

Logo de seguida aos equipamentos apresentados anteriormente, o equipamento que apresenta maior potência térmica dissipada é o EMILLO_SNT da Altice Labs. Este dissipa cerca de 120 W de energia sob a forma de calor. É um equipamento modular, do tipo *Multi-Service Provisioning Platform*, compacto e de transmissão e multiplexagem, ou seja, a função deste equipamento é permitir a comunicação e ligação entre várias redes (PT Inovações, 2017) (Delgado, 2016)

Por último, são utilizados equipamentos com a função de transmitir os sinais entre a rede móvel e a rede fixa, denominados routers. Existem inúmeras possibilidades no mercado deste tipo de equipamentos, com diferentes modelos e diferentes marcas que permitem obter o mesmo objetivo. Após a verificação de vários modelos de "routers", chegou-se à conclusão que a

potência térmica dissipada variava de modelo para modelo e também da quantidade de dados que está a ser transmitida no momento. Deste modo optou-se por utilizar um valor aproximado para a potência térmica dissipada de 35 W para estes equipamentos. Assim o somatório da potência do conjunto dos equipamentos referidos anteriormente perfaz um total de 450 W. Segundo a norma EN 300 019-1-3 da ETSI (European Telecommunications Standards Institute), a temperatura no interior do armário de telecomunicações não deve ultrapassar os 55 °C.

A empresa concessionária é a responsável pela escolha do tipo e modelo dos equipamentos instalados no interior do armário, tendo em conta as suas características e o objetivo pretendido, de modo a obter um melhor desempenho nas funções necessárias, pelo que a potência dissipada pode várias de equipamento para equipamento. Na Figura 4.2 está apresentado um armário de telecomunicações que incorpora os equipamentos referidos anteriormente e em pleno funcionamento.



Figura 4.2 - Armário ABE_V2, equipado com os equipamentos referidos e em pleno funcionamento (Delgado, 2016).

4.1.3. Sistema de arrefecimento original

Este armário está equipado com um sistema de ventilação responsável por manter a temperatura no interior do armário abaixo dos 55 °C. Primeiramente o arrefecimento do armário é efetuado através da ventilação natural. Por sua vez, quando este tipo de arrefecimento não é suficiente para manter a temperatura interna desejada, recorre a um

sistema mecânico de ventilação. Este sistema procede ao arrefecimento do armário através da convecção forçada do ar. De modo a impor a circulação do ar, o armário possui dois ventiladores axiais, devidamente dimensionados e posicionados de modo a cumprir os requisitos de temperatura de funcionamento. Os ventiladores, modelo 4318 da marca EBM PAST, encontram-se instalados na zona central da parte inferior da cobertura, como referido anteriormente. O funcionamento ou paragem dos mesmos é dependente da temperatura interior, que pode ser seleccionada pela empresa responsável - no caso deste armário a temperatura de acionamento dos ventiladores é de 35 °C. O conhecimento da temperatura resulta de um sensor existente na zona superior do armário que dá sinal aos ventiladores para o arranque ou paragem dos mesmos. Estes ventiladores funcionam a uma tensão nominal de 48 VDC, consumindo uma potência de 5,1 W, e permitem um caudal nominal, em vazio, de 170 m³/h (EBM PAST, 2018). Na Figura 4.3 são apresentados os ventiladores presentes no interior do armário e o local da sua instalação.

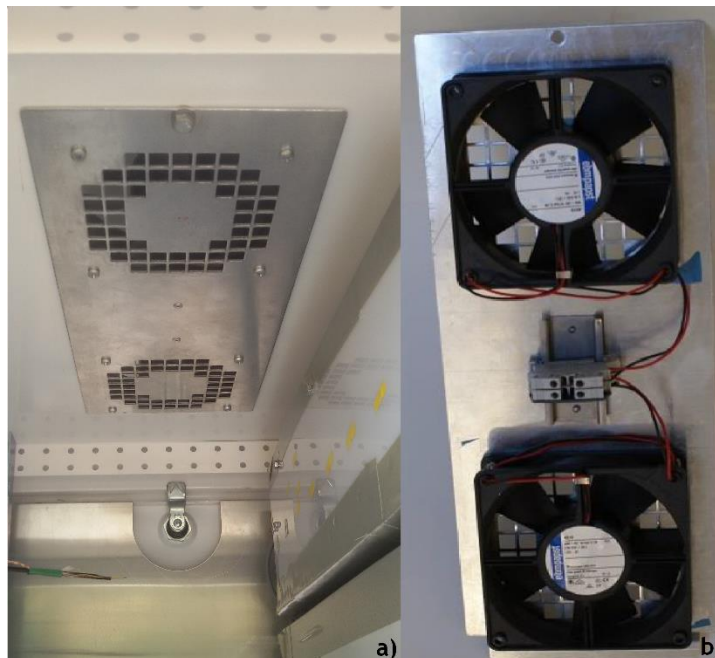


Figura 4.3 - a) Localização dos ventiladores instalados no armário; b) Ventiladores, modelo 4318 da EBM PAST.

O bom funcionamento deste sistema é bastante dependente do caudal de ar e da diferença de temperaturas entre o interior e ar exterior. Quanto maior forem estes fatores maior será a quantidade de calor retirado do interior do armário, tendo em conta que a temperatura exterior deve ser mais reduzida do que a interior, melhorando assim o desempenho deste sistema de arrefecimento. O arrefecimento do armário é obtido devido ao facto dos ventiladores forçarem o ar quente a sair pelas ranhuras existentes nas extremidades inferiores da cobertura. Deste modo é criado um gradiente de pressão, forçando o ar exterior a entrar pelas ranhuras existentes nas superfícies externas das paredes laterais. Consequentemente, este ar passa pelo

interior do armário, em direção aos ventiladores, arrefecendo os equipamentos existentes no interior.

4.2. Permutador de calor ar-solo

Nesta secção é descrito o permutador de calor ar-solo utilizado para a realização dos ensaios, sendo apresentada a sua localização geográfica, que é a mesma onde foram realizados todos os ensaios. Por fim são abordadas as suas características construtivas e especificações, através da descrição do mesmo.

4.2.1. Localização geográfica

O permutador de calor ar-solo foi idealizado, projetado, construído e implementado pelo Prof. Doutor Luís Pires e por um antigo aluno da Universidade da Beira Interior (UBI), Anthony Calado (2016). O permutador encontra-se enterrado nas instalações da UBI, mais especificamente na Faculdade de Engenharias, junto ao Centro de Formação Interação UBI Tecido Empresarial (CFIUTE), segundo as coordenadas GPS $40^{\circ} 16' 43'' N$ $7^{\circ} 30' 48'' W$. Na Figura 4.4 esta assinalada com um círculo vermelho a localização geográfica do permutador.



Figura 4.4 - Localização geográfica do permutador de calor ar-solo empregue no presente estudo.

4.2.2. Descrição e especificações do permutador

O permutador de calor ar-solo está enterrado a uma profundidade máxima de três metros, segundo Calado (2016) este valor deve-se essencialmente ao custo associados ao processo de escavação, sendo que pela literatura já é considerada uma boa profundidade para se realizarem estes tipos de estudos. O seu comprimento total é de 28,4 m, medida escolhida devido aos benefícios relacionados com um longo circuito de permuta de calor. O permutador apresenta ainda um formato helicoidal, que não é comum neste tipo de sistemas. Este formato foi escolhido com o objetivo de reunir dados do seu desempenho, contribuindo assim para novos desenvolvimentos na investigação desta tecnologia de climatização. Na Figura 4.5 é possível

visualizar o formato do permutador de calor. O permutador foi construído recorrendo a tubos e acessórios de PVC, com um diâmetro externo de 0,075 m e uma espessura de 0,0015 m. Este tipo de material, no ponto de vista da literatura, é muito utilizado nestes trabalhos experimentais. Por outro lado, o reduzido custo de aquisição, montagem simples, resistência e durabilidade foram outros aspetos a ter em conta. Para além disso, e como já foi referido na secção 3.2.2 da presente dissertação, o material de construção do permutador tem pouca influência no desempenho do mesmo. Relativamente ao espaçamento entre os patamares, encontram-se distanciados cerca de 0,150 m entre si, perfazendo um total de cinco patamares. Este valor corresponde a duas vezes o diâmetro externo do tubo, tal como é sugerido pela literatura e referido na secção 3.2.2 desta dissertação, onde a distância mínima recomendada entre tubos adjacentes seja cerca de duas vezes o diâmetro externo do tubo. Na Tabela 4.1 é apresentado um resumo das especificações do permutador de calor ar-solo.

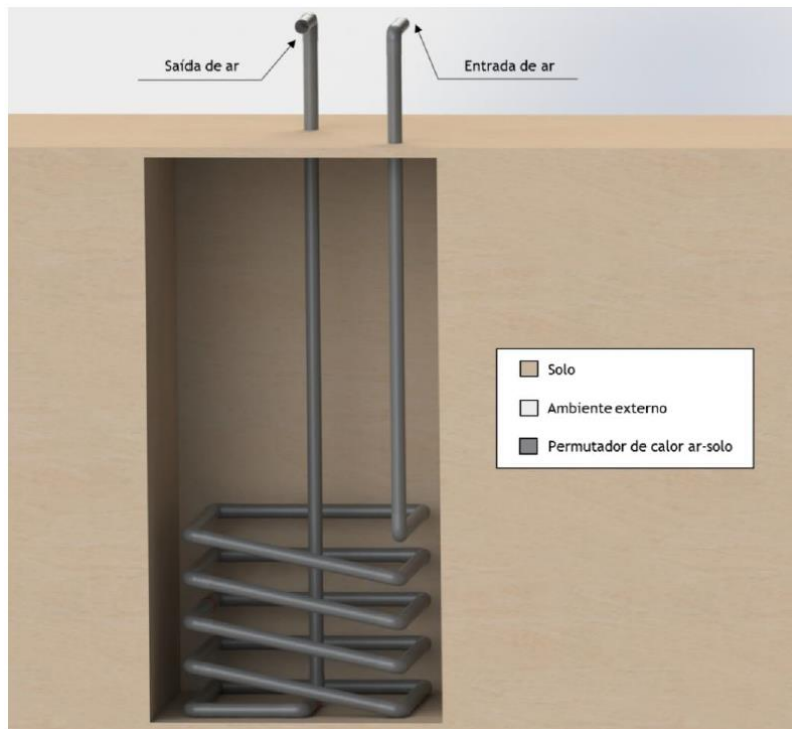


Figura 4.5 -Esboço ilustrativo do permutador de calor ar-solo (Calado, 2016).

Tabela 4.1 - Resumo das especificações do permutador de calor ar-solo. Adaptado de Calado (2016).

Permutador de calor ar-solo				
Comprimento total [m]	Diâmetro externo do tubo [m]	Espessura do tubo [m]	Profundidade máxima [m]	Área total de superfície [m ²]
28,4	0,0075	0,0015	3	6,751

4.3. Equipamentos auxiliares

De forma a simular o normal funcionamento do armário de telecomunicações, recolher toda a informação relevante no estudo realizado e, ainda, proceder ao arrefecimento do interior do armário, foram utilizados equipamentos auxiliares cujas especificações mais importantes se apresentam de seguida.

4.3.1. Medição da temperatura

No caso do presente estudo, a temperatura é um dos parâmetros a recolher e dado a necessidade da sua monitorização em diversos pontos em simultâneo, foi necessário recorrer a um equipamento capaz de ler e registar este parâmetro essencial, um data logger de temperatura com 12 canais (PCE instruments, PCE-T 1200), apresentado na figura seguinte.



Figura 4.6 - Data logger PCE-T 1200 da PCE instruments.

Este equipamento possibilita a utilização de diversos tipos de termopar que podem ser conectados (K, J, T, E, R, S). No entanto, foram somente utilizados termopares do tipo K, para os ensaios com o permutador, e do tipo T, utilizado na recolha dos valores das temperaturas do solo nos diferentes locais.

Este aparelho, para além de permitir realizar medições facultando os valores da temperatura em tempo real, também pode fazer o seu registo durante um período e intervalo de tempo desejados, através de um cartão SD. Posteriormente, os dados obtidos podem ser importados para um computador num ficheiro Excel.

Na tabela seguinte estão descritas outras características técnicas da *data logger*, além das já referidas anteriormente.

Tabela 4.2 - Algumas características técnicas do *data logger* PCE-T 1200 da PCE *instruments*.

Precisão	$\pm 0,4 \% + 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Exatidão	0.1 $^\circ\text{C}$ /1 $^\circ\text{C}$ ou 0.1 $^\circ\text{F}$ /1 $^\circ\text{F}$
Intervalo de leitura	1 segundo até 3600 segundos
Alimentação	Bateria interna (8x1.5 V) ou transformador equivalente
Condições de operação	0 $^\circ\text{C}$ até 50 $^\circ\text{C}$ <85% humidade

4.3.2. Medição da velocidade

À semelhança da temperatura, também a velocidade do escoamento foi um dos parâmetros essenciais a recolher no âmbito deste estudo.

A medição da velocidade foi realizada através de um anemómetro de hélice, cujo modelo é Testo 416, apresentado na Figura 4.7. Este aparelho apresenta uma precisão associada às medições de $\pm 0,2 \text{ m/s} + 1,5\%$ do valor médio da leitura efetuada.



Figura 4.7 - Anemómetro de hélice, modelo Testo 416.

Para garantir o posicionamento adequado do anemómetro e, conseqüentemente, assegurar a correta medição da velocidade, foi utilizado um suporte, de modo a que o rotor da turbina se localize no centro geométrico da secção transversal da tubagem responsável pelo retorno do ar

ao permutador de calor. Na Figura 4.8 pode-se observar os detalhes relativos à posição do anemómetro com o respetivo suporte. Em relação ao procedimento do registo das medições de velocidade do ar efetuadas, foram realizadas duas medições por cada ensaio.

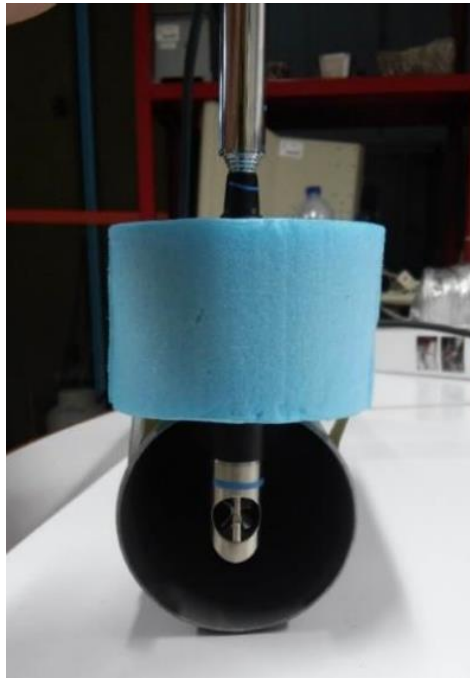


Figura 4.8 - Posicionamento do anemómetro com o respetivo suporte (Calado, 2016).

4.3.3. Sistema de ventilação

Para proceder ao arrefecimento do armário de telecomunicações através do permutador de calor ar-solo foi necessário recorrer a um sistema de ventilação mecânica, de modo a garantir um caudal de ar uniforme, contínuo e unidirecional.

Este sistema baseia-se no ventilador da marca S&P, modelo TD-800/200, apresentado na Figura 4.9. Este ventilador garante um caudal suficiente para superar as principais perdas de carga localizadas (cerca de 24 curvas de 90°) e, as perdas de carga em linha ao longo do permutador. Existem ainda outras perdas de carga nas tubagens que permitem a ligação entre permutador e armário, tais como, três curvas de 90° , uma curva de 45° e duas reduções de 200 mm para 75 mm.



Figura 4.9 - Ventilador TD-800/200 da marca S&P.

O ventilador está equipado com um motor monofásico de duas velocidades, alimentado com uma tensão de 220 V e 60 Hz de frequência. Na Tabela 4.3 são apresentadas as principais características técnicas do ventilador utilizado nos ensaios, de salientar que, os valores do caudal apresentados são obtidos sem qualquer limitação à passagem do ar. Este ventilador está ainda equipado com um sistema de proteção térmica, por fusível, que suspende a alimentação elétrica assim que este esteja sujeito a temperaturas de funcionamento superiores a 60 °C.

Tabela 4.3 - Algumas características técnicas Ventilador TD-800/200 da marca S&P

Potência [W]	Velocidade de rotação [rpm]	Caudal [m ³ /h]
121	2370	1000
112	1980	840

Visto que o diâmetro do permutador (75 mm) é diferente do diâmetro do ventilador utilizado (200 mm), foi necessário utilizar duas reduções, uma para a entrada outra para a saída do ventilador, de modo a permitir a ligação entre o permutador de calor e o ventilador, e o ventilador e o armário. Na Figura 4.9 é possível visualizar as reduções acopladas ao ventilador.

As reduções foram dimensionadas tendo em conta os princípios da norma EN 1506:2007, que tem como objetivo estabelecer todas as dimensões e tolerâncias para condutas de metal e acessórios de secção circular usados em sistemas de ventilação. De seguida é apresentada a fórmula matemática que permite o seu dimensionamento, como também o esquema representativo dos diversos parâmetros.

$$l = \frac{d_1 - d_2}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}; 15^\circ < \alpha < 60^\circ \quad (4.1)$$

Em que:

- l - Distância horizontal da projeção do trapézio intermédio, [mm];
- d_1 e d_2 - Diâmetro maior e menor, respetivamente, [mm];
- α - Ângulo de abertura, [°].

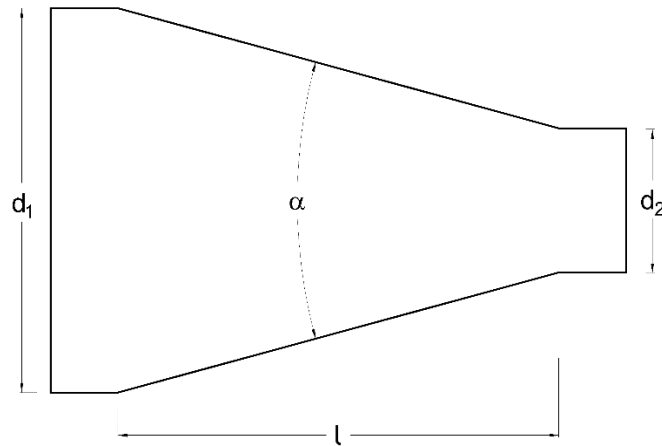


Figura 4.10 - Esquemática dos parâmetros do dimensionamento das reduções.

Para o cálculo da distância l , foi escolhido um valor de $\alpha=30^\circ$, tendo em conta a distância disponível entre o permutador e o armário, e assim obtido $l \approx 233,25$ mm, este valor foi arredondado para 230 mm para facilitar o fabrico da peça. Na Figura 4.11 estão representadas todas as dimensões das peças fabricadas.

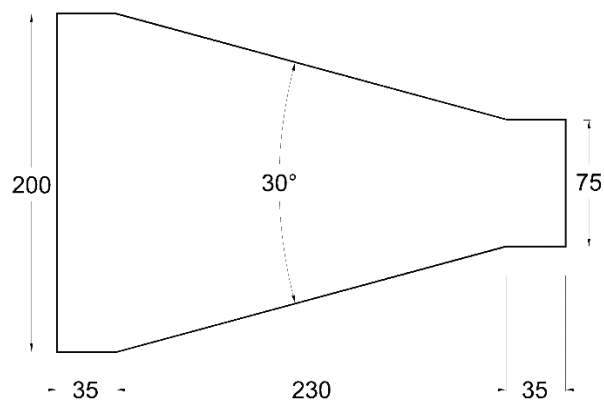


Figura 4.11 - Dimensões das peças, em milímetros [mm].

Outra particularidade do sistema de ventilação, é que o mesmo foi colocado na saída do permutador e ao nível da mesma, cerca de 66 cm acima do nível do solo. Consequentemente, e de forma a reduzir a distância e as perdas localizadas entre a saída do permutador de calor e o armário, este foi também elevado de modo a que o ventilador ficasse nivelado

horizontalmente entre a saída do permutador e a entrada do armário. O ventilador foi ainda coberto com isolamento térmico refletivo de modo a reduzir os ganhos térmicos provenientes do exterior, mais especificamente, a radiação solar incidente. Outro elemento que foi necessário também isolar com isolamento térmico refletivo, devido aos mesmos motivos, foi o tubo de retorno do ar para o permutador, este direciona o ar quente proveniente do armário para a entrada do permutador. O tubo, com as mesmas características do material de construção do permutador, foi inserido numa manga reforçada com mola de arame de aço de alta tensão coberta com isolamento de lã de rocha e revestida no interior e exterior com alumínio. Na Figura 4.12 é possível visualizar estes dois componentes isolados, sendo que, para melhor perceção da posição e localização do ventilador em relação ao solo e os restantes componentes deste sistema, o mesmo é apresentado na posição de funcionamento com e sem isolamento térmico.



Figura 4.12 - Ventilador e respetivos acessórios instalados. a) ventilador e tubo de retorno com isolamento térmico; b) ventilador sem isolamento térmico e tubo de retorno com isolamento térmico.

4.3.4. Sistema de aquecimento

De modo a simular a dissipação de calor gerada pelos dispositivos eletrónicos, foi utilizada uma caixa metálica com uma resistência elétrica no seu interior (Delgado, 2016). A caixa foi contruída tendo em conta o tamanho de um equipamento de telecomunicações usualmente instalado neste armário de telecomunicações. Assim, apresenta uma forma paralelepípedica,

com uma largura de 415 mm, 310 mm de profundidade e 90 mm de altura, ocupando assim 2U. Foi contruída em chapa de aço com 2 mm de espessura. Esta possui vários furos na parte posterior e duas aberturas na face lateral onde estão instalados dois ventiladores de 12 V, de forma a dissipar o calor gerado pela resistência elétrica, pormenores apresentados na Figura 4.13.

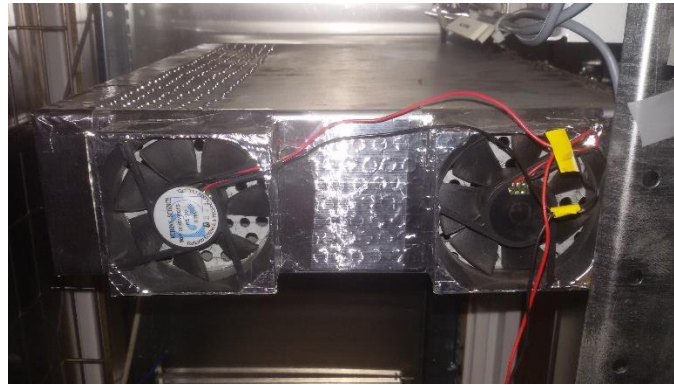


Figura 4.13 - Pormenor dos furos e dos ventiladores instalados na caixa dissipadora de calor.

A resistência elétrica instalada no interior da caixa é uma resistência de 50 Ω , apresentada na Figura 4.14. A variação da potência térmica dissipada pela resistência é possível através da variação da tensão elétrica fornecida. Assim, a tensão elétrica que é necessário fornecer é dada pela equação (10), considerando um rendimento térmico de 1.

$$U = \sqrt{P * R} \quad (4.2)$$

Onde:

- U - Tensão elétrica, [V];
- P - Potência térmica dissipada, [W];
- R - Resistência elétrica, constante, 50 [Ω].



Figura 4.14 - Resistência térmica existente no interior da caixa dissipadora de calor.

De modo a conhecer a fonte de alimentação para um correto e exato valor de tensão fornecida à resistência elétrica, foi utilizado um multímetro digital da marca *Fluke*, modelo 177, apresentado na Figura 4.15. O mesmo foi utilizado para medição da tensão nos restantes

sistemas de alimentação, que serão apresentados seguidamente. Na Tabela 4.4 é apresentada a exatidão de medida deste aparelho para diferentes tipos de tensão e corrente.



Figura 4.15 - Multímetro digital Fluke, modelo 177.

Tabela 4.4 - Exatidão da medição do multímetro Fluke, modelo 177 (Fluke, 2008).

Exatidão	+/- [(% de leitura) + (contagem)]
Tensão AC:	2,0% + 3
Tensão DC:	0,09% + 2
Corrente AC:	1,5% + 3
Corrente DC:	1,0% + 3

4.3.5. Sistemas de alimentação

Visto que o sistema de distribuição de energia do armário não se encontrava ligado à rede elétrica, foi necessário encontrarem outras soluções para fornecer a energia necessária aos equipamentos elétricos essenciais para a realização dos ensaios. Posto isto, foram utilizadas duas fontes de tensão e um transformador devido à necessidade de diversos tipos de tensão e com finalidades distintas. Assim, no que respeita à alimentação da resistência elétrica, aplicada para simular o calor dissipado pelos componentes eletrónicos, foi utilizada uma fonte de tensão alternada variável, modelo SV- 8A, apresentada na Figura 4.16. Esta permite variar a tensão de saída entre 0 V até ao valor máximo de 250 V e deste modo variar a potência térmica dissipada no interior do armário.



Figura 4.16 - Fonte de alimentação AC variável, modelo SV-8A.

Outra fonte de alimentação utilizada, Figura 4.16, serviu para fornecer energia elétrica aos ventiladores responsáveis pela dissipação do calor gerado pela resistência elétrica. Esta fonte foi reaproveitada de um computador fixo e adaptada para a finalidade pretendida, de modo a fornecer 12 VDC, tensão de funcionamento dos ventiladores instalados na caixa dissipadora de calor. A mesma encontra-se equipada com um interruptor ON/OFF para ligar/desligar os ventiladores mais facilmente.



Figura 4.17 - Fonte de alimentação dos ventiladores da caixa dissipadora de calor.

Outro equipamento que necessita de alimentação elétrica são os ventiladores situados na base da cobertura do armário, que fazem parte do seu sistema de arrefecimento original, referidos

na secção 4.2.3 da presente dissertação. Para tal foi utilizado um transformador de tensão AC/DC de 48 V, Figura 4.18. Este permite uma corrente máxima de 0,5 A e conseqüentemente uma potência de 24 W.



Figura 4.18 - Transformador AC/DC 48 V.

4.4. Estudos experimentais

Nesta secção serão apresentados e explicados todos os estudos experimentais realizados no âmbito da presente dissertação. De salientar que foram realizados dois estudos em paralelo. Um deles incidiu na monitorização da temperatura do solo em três localizações diferentes, trabalho iniciado por Calado (2016) e continuado por Diogo (2017) com o propósito de analisar as variações da temperatura do solo e o seu comportamento térmico ao longo do ano e, pontualmente, em períodos de 24 horas.

O outro estudo incidiu no arrefecimento de um armário de telecomunicações recorrendo a um permutador de calor ar-solo, variando a carga térmica dissipada no interior do armário e o caudal de ar utilizado para o seu arrefecimento. Posto isto, o objetivo final será analisar o desempenho térmico do sistema, que será apresentado e discutido no capítulo 5.

4.4.1. Monitorização da temperatura do solo

A monitorização da temperatura do solo foi realizada com o intuito de analisar a variação da temperatura do solo em três locais da cidade da Covilhã a profundidades diferentes, entre 1 m até os 5 m, metro a metro. Neste estudo foram realizados dois tipos de ensaios, um ensaio de ciclo diário, onde se procedeu ao registo da temperatura do solo e da temperatura exterior nas

diferentes localizações durante 24 horas, e ensaios de ciclo “sazonal”, que consistiram na monitorização semanal das mesmas temperaturas do ensaio anterior e nas mesmas localizações. A diferença entre estes dois tipos de ensaio é apenas o período em que foram registadas as variações de temperatura. O registo destes dados permitiu analisar o perfil da temperatura nas três localizações em períodos de 24 horas e ao longo do ano.

Em relação aos ensaios de ciclo “sazonal”, as medições da temperatura do solo e exterior foram recolhidas ao longo do ano, todas as segundas-feiras, entre as 12:00 e as 14:00, salvo raras exceções em que eram realizadas no dia seguinte. Os valores foram registados desde o dia 25 de setembro de 2017 até 24 de setembro de 2018. Para o registo das temperaturas desejadas recorreu-se ao *data logger*, descrito na secção 4.3.1. De referir que, após a ligação dos termopares ao equipamento, aguardava-se cerca 2 minutos com o intuito de estabilizar os valores recolhidos.

O ensaio de ciclo diário, como referido anteriormente, consistiu no registo da temperatura do solo e da temperatura exterior, durante um período de 24 horas, nas três localizações. À semelhança dos ensaios de ciclo “sazonal”, também neste foi utilizado o *data logger* para registar os valores das temperaturas, tendo este sido programado para registar os dados em intervalos de tempo de 10 minutos. Estes ensaios foram realizados entre o dia 20 de junho e o dia 23 de junho de 2018. Na Tabela 4.5 são apresentadas, mais especificamente, as datas em que foram realizados os ensaios nas diferentes localizações.

Tabela 4.5 - Datas da monitorização da temperatura do solo ao longo de 24h nos locais A, B e C.

Local	Data
A	21/06/2018 - 22/06/2018
B	22/06/2018 - 23/06/2018
C	20/06/2018 - 21/06/2018

Nas figuras seguintes são apresentados os locais onde foram implementadas as sondas. Na Figura 4.19 estão assinalados os locais onde se encontram duas das três sondas, localizadas nas imediações da reitoria da Universidade da Beira Interior, a Noroeste do edifício dos Serviços de Ação Social (SASUBI), denominadas por A - “Reitoria_Baixo” e B - “Reitoria_Cima”. A sonda A encontra-se a uma altitude de 711 m e nas coordenadas GPS 40°16’31” N 7°30’37” W. A sonda B está localizada segundo as coordenadas GPS 40°16’30” N 7°30’38” W, a uma altitude de 716 m (Calado, 2016).



Figura 4.19 - Localização geográfica das sondas A e B.

A Figura 4.20 apresenta o local onde está implementada a terceira sonda, denominada por C - “Engenharias”. Esta está localizada a Sul da Faculdade de Engenharia junto ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), a uma altitude de 662 m e segundo as coordenadas GPS $40^{\circ} 16' 41''$ N $7^{\circ} 30' 46''$ W (Calado, 2016).

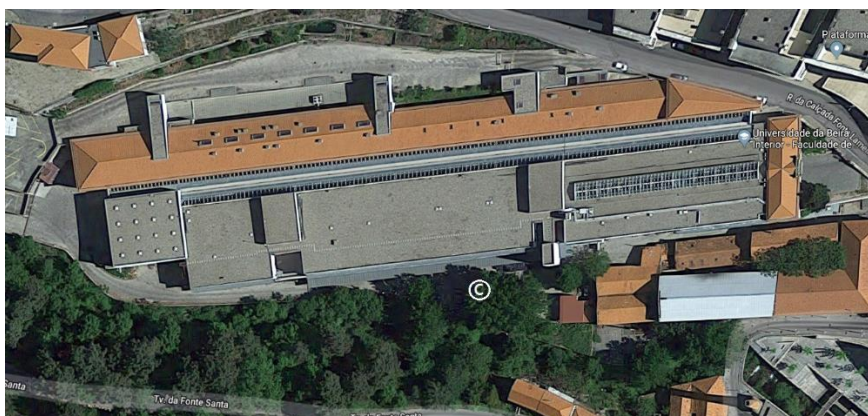


Figura 4.20 - Localização geográfica da sonda C.

As sondas implementadas nestes locais, de modo a proteger o fio termopar que as constitui de possíveis contrastes provenientes do solo, foram revestidas por um tubo rígido VD (PVC) com 5,25 m de comprimento e 16 mm de diâmetro externo (IBOTEC, tubo VD). Como se pode verificar pela Figura 4.21 a cada metro foi colocado um termopar no exterior do tubo, através da realização de um furo no mesmo, com o intuito dos termopares ficarem em contato direto com o solo. O fio termopar utilizado nas sondas é do tipo T (Omega Engineering Inc., PRT24) que permite a leitura de temperatura na gama -270° C a 370° C. Na Figura 4.21 apresenta-se um esquema das sondas implementadas.

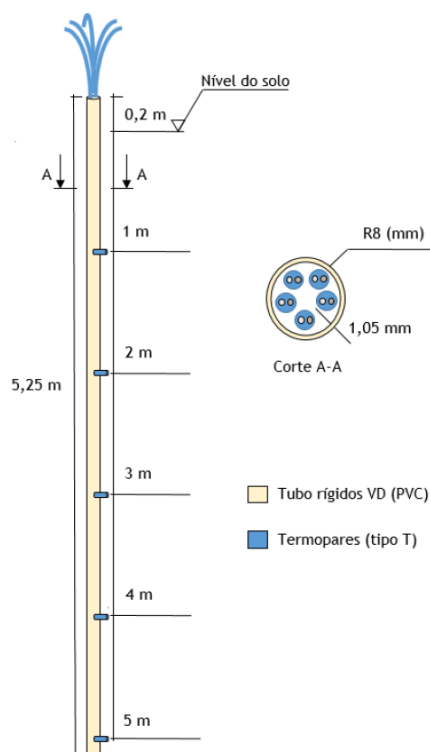


Figura 4.21 - Esquema representativo da construção das sondas (Calado, 2016).

4.4.2. Ensaios com o armário de telecomunicações e o permutador de calor ar-solo

Os ensaios realizados tiveram o intuito de verificar a possibilidade do arrefecimento do armário de telecomunicações através de um permutador de calor ar-solo, tendo em vista a redução do consumo de energia elétrica do sistema, e posterior análise do desempenho térmico do sistema. Assim, foram realizados vários ensaios em que a configuração do sistema utilizada foi a de circuito fechado. Foi ainda realizado um ensaio com o sistema de arrefecimento original do armário, ventiladores existentes na parte superior, de forma a possibilitar a comparação com os resultados obtidos nos ensaios referidos anteriormente.

Todos os ensaios experimentais foram realizados entre o dia 23 de julho e o dia 31 julho de 2018, de modo a simular o funcionamento do armário em dias críticos em que o arrefecimento do mesmo é mais solicitado, ou seja, em dias com elevada temperatura exterior e elevada radiação solar incidente. Os ensaios foram efetuados em dias sequenciais de modo a obter condições climáticas idênticas entre si.

Com o objetivo dos ensaios se aproximarem o mais possível do funcionamento normal do armário de telecomunicações, o mesmo foi colocado no exterior das instalações da UBI, mais especificamente na Faculdade de Engenharias junto ao Centro de Formação Interação UBI

Tecido Empresarial (CFIUTE), local onde se encontra implementado o permutador de calor, orientado a sul e sem qualquer obstrução solar no decorrer do período diurno. Assim, foi maximizado o tempo de exposição solar bem como a radiação incidente. Para além dos ganhos térmicos externos, provenientes da temperatura exterior e da radiação solar, como referido na secção 4.3.4, o armário está equipado com uma resistência para dissipar calor de forma a simular a dissipação térmica dos equipamentos de telecomunicações.

Posto isto, foi testada a possibilidade de arrefecimento do armário através do permutador de calor ar-solo. Foram assim realizados ensaios com três potências térmicas dissipadas diferentes pela resistência e com caudais de ar também diferentes, de forma a perceber a influência do caudal de ar no arrefecimento do armário. Com o sistema de arrefecimento original do armário foi realizado apenas um ensaio, no qual foi utilizado o valor intermédio das potências térmicas dissipadas durante os outros ensaios.

A grande diferença entre estes dois tipos de ensaios realizados é que no arrefecimento do armário, recorrendo ao permutador de calor ar-solo, o ar que entra no armário é proveniente do permutador. No ensaio realizado com sistema de arrefecimento original, o ar que permite o arrefecimento do interior do armário é proveniente do exterior.

Todos os ensaios tiveram início entre as 10:00 e as 10:30, de forma aproveitar o máximo de radiação solar. De modo a simular o funcionamento do sistema de forma credível os ensaios tiveram uma duração de 24 horas. Tal como aconteceu nos ensaios da monitorização da temperatura do solo, o *data logger* também foi programado para registar os valores dos diversos termopares a cada 10 minutos.

No total foram registados os dados provenientes de 9 termopares, 2 instalados no interior do armário (Figura 4.22), 5 localizados no interior do permutador de calor ar-solo (Figura 4.23), um na saída do permutador, e o último foi colocado próximo da caixa metálica de modo a medir a temperatura ambiente sem influência da radiação solar, ou seja, foi colocado à sombra. No que se refere aos termopares instalados no interior do armário, o termopar 1 foi instalado acima da caixa dissipadora de calor, e o termopar 2 encontra-se instalado na saída de ar do armário.

De referir que, o termopar 2 teve dois posicionamentos diferentes, dependendo do tipo de ensaio. Nos ensaios realizados com o arrefecimento do armário através do permutador de calor, sistema em circuito fechado, o termopar foi colocado de modo a registar a temperatura a que o ar saía do armário e que, posteriormente, era direcionado para o permutador de calor, posição 2, Figura 4.22. No ensaio com o sistema de arrefecimento original do armário, o termopar foi colocado no interior da cobertura, próximo das ranhuras existentes que permitem a saída do ar quente, mantendo a sua função de medir a temperatura do ar à saída do armário, sendo que neste caso o ar é expulso para o exterior, posição 2', Figura 4.22. Esta alteração foi

necessária pois a saída de ar é diferente dependendo do tipo de ensaio realizado. Os restantes termopares mantiveram sempre a sua localização em todos os ensaios realizados.



Figura 4.22 - Esquerda: Localização dos termopares presentes no interior do armário; Direita: Pormenor das localizações do termopar 3.

Os termopares presentes no permutador foram instalados no âmbito do trabalho de Calado, 2016. As localizações dos mesmos serviram para 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 segundo (B) a 8,73 m, o terceiro (C) a 14,26 m, o quarto (D) a 19,24 m e o último (E) a 24,77 m (Calado, 2016).

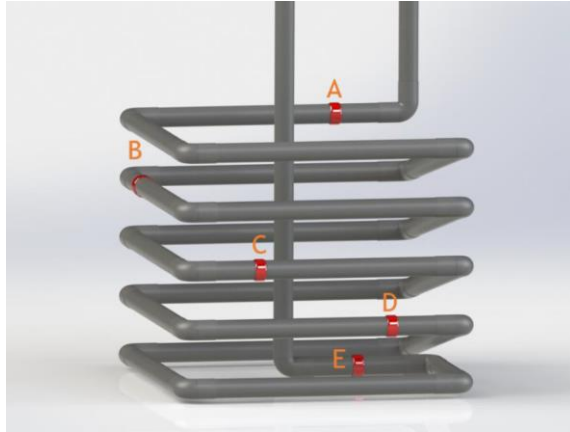


Figura 4.23 - Localização dos termopares ao longo do permutador (Calado, 2016).

Na realização dos ensaios foi necessário utilizar uma caixa metálica (Figura 4.24) com o objetivo de abrigar todos os instrumentos de medição e alimentação necessários. A mesma foi colocada de forma a evitar a radiação solar, nas horas mais quentes do dia, promovendo um ambiente melhor para os equipamentos mais sensíveis colocados no seu interior.



Figura 4.24 - Caixa metálica que abriga alguns dos equipamentos auxiliares.

4.4.2.1. Ensaios do arrefecimento do armário apenas com o ar proveniente do permutador de calor ar-solo - Circuito fechado

O principal objetivo deste tipo de ensaios é analisar o desempenho deste sistema de arrefecimento e verificar se o mesmo consegue extrair as diferentes cargas térmicas causadas pela resistência elétrica, colocado no interior do mesmo.

Para tal, foram realizados 6 ensaios deste tipo, podendo dividir-se em dois grupos consoante o caudal de ar. Nos primeiros três ensaios o ventilador funcionou à potência máxima, proporcionando um caudal de ar de $62 \text{ m}^3/\text{h}$, nos restantes três ensaios deste tipo, o ventilador

funcionou a uma potência mais baixa, proporcionando um caudal de ar de 55,7 m³/h. Para cada caudal de ar foram aplicadas três potências térmicas diferentes, uma em cada ensaio realizado, 150 W, 300 W e 450 W, perfazendo assim um total de 6 ensaios. Apresentam-se na Tabela 4.6 os caudais volumétricos e as potências térmicas dissipadas associadas a cada ensaio e respetiva data da sua concretização.

Tabela 4.6 - Tabela resumo das características de cada ensaio e datas de realização.

Ensaio	Caudal volumétrico [m ³ /h]	Potência térmica dissipada [W]	Data
1		150	23/07/2018
			-
2	62,02	300	24/07/2018
			-
3		450	24/07/2018
			-
4		450	25/07/2018
			-
5	55,67	300	25/07/2018
			-
6		150	26/07/2018
			-
			26/07/2018
			27/07/2018
			28/07/2018
			29/07/2018
			29/07/2018
			30/07/2018

Como se pode verificar na Tabela 4.6, os ensaios foram realizados em dias consecutivos, de forma a que as condições exteriores fossem as mais semelhantes quanto possível, exceto entre os ensaios 4 e 5 uma vez que quando se chegou ao local o *data logger* não tinha gravado os valores.

Como o pretendido nestes ensaios é estudar o arrefecimento do armário de telecomunicações recorrendo apenas ao ar proveniente do permutador de calor ar-sole e proceder à circulação do ar utilizando o ventilador apresentado na secção 4.4.3, primeiramente foram retirados os ventiladores existentes no armário, que pertencem ao seu sistema de arrefecimento original.

Com o objetivo deste sistema funcionar em circuito fechado, o procedimento seguinte destes ensaios consistiu em vedar, com fita de alumínio, todas as possíveis fugas de ar, de modo a eliminar qualquer tipo de troca de ar entre o interior e o exterior do armário. Nas figuras seguintes é possível visualizar alguns dos locais onde foi necessário aplicar essa medida. A Figura 4.25 apresenta a zona entre a saída do permutador e entrada do armário, onde é possível

visualizar-se as zonas que foram vedadas, geralmente junções entre elementos diferentes (junções entre ventilador e reduções e uniam entre reduções e acessórios de PVC). A Figura 4.26 expõe o local de saída do ar quente para o tubo de retorno, isolado, onde também são visíveis outras zonas que sofreram esta intervenção. Onde também surgiu a necessidade de implementar esta medida foi no pedestal (Figura 4.27), foram vedadas as ranhuras existentes na parte inferior da cobertura (Figura 4.28).



Figura 4.25 - Vedações realizadas na ligação entre a saída de ar do permutador de calor ar-solo (esquerda) e a entrada de ar no armário (direita).



Figura 4.26 - Ligação entre a saída de ar do armário e o tubo de retorno para o permutador.



Figura 4.27 - Zona do pedestal isolada.



Figura 4.28 - Ranhuras da cobertura vedadas.

Após este procedimento, iniciou-se a ligação de todos os termopares ao *data logger*, verificando se não existia nenhum problema na ligação. Ligaram-se também os ventiladores da caixa dissipadora de calor, regulou-se a fonte de tensão, que alimenta a resistência elétrica, no valor de tensão pretendido e, por último, ligou-se o ventilador. Na mudança entre ensaios foram retirados os registos do *data logger* e foi redefinido o valor da fonte de tensão para o próximo valor pretendido, de forma a variar a potência térmica dissipada. Entre os ensaios 3 e 4 foi apenas mudado o caudal de ar, alternando a potência de funcionamento do ventilador. Na Figura 4.29 é apresentado o sentido do fluxo de ar e a montagem final deste tipo de ensaios.



Figura 4.29 - Esquema do fluxo de ar no sistema ensaiado.

4.4.2.2. Ensaio com o sistema de arrefecimento original do armário (ventilação forçada do ar exterior)

Após a realização dos ensaios referidos anteriormente, foi a vez de realizar o ensaio com o sistema de arrefecimento original do armário. O objetivo da realização deste ensaio foi comparar os resultados obtidos nos diferentes ensaios, de modo a perceber até que ponto é mais favorável ou não a utilização do permutador de calor para o arrefecimento do armário de telecomunicações.

Este ensaio teve início no dia 31 de julho de 2018 pelas 10:00 e durou até ao mesmo horário do dia 1 de agosto de 2018, completando um período de 24 horas.

Para a realização deste ensaio foram retirados todos os isolamentos e vedações instaladas para a realização dos ensaios anteriores, excetuando as do pedestal, de modo a permitir o fluxo de ar original. Além disso, os locais relativos à entrada e à saída de ar do armário, utilizadas nos outros ensaios, foram vedadas. Deste modo manteve-se o fluxo de ar normal de acordo com o sistema de arrefecimento original do armário (ventiladores). Foram, assim, montados os ventiladores originais que tinham sido retirados para a realização dos ensaios anteriores. Estes têm a função, na configuração original, de extrair o calor gerado pela resistência elétrica, evitando que a temperatura interna do armário atinja 55 °C. Assim, este ensaio foi executado sem recorrer a qualquer tipo de equipamento auxiliar para proceder ao arrefecimento do armário.

Após estes procedimentos, ligaram-se, de novo, todos os termopares ao *data logger*, os ventiladores da caixa dissipadora de calor, regulou-se a fonte de tensão, que alimenta a resistência elétrica, de forma a que a potência térmica dissipada fosse de 300 W. Seguidamente, todos os equipamentos foram ligados às respetivas fontes de alimentação e por último ligou-se o sistema de ventilação original do armário.

Na Figura 4.30 é apresentado o esquema da circulação do ar neste ensaio. Verifica-se que, devido aos ventiladores, o ar exterior é forçado a entrar pelas ranhuras inferiores, situadas nas faces laterais do armário. Por sua vez, ao entrar em contacto com a caixa dissipadora, no interior do armário, o ar recebe a carga térmica e, conseqüentemente, aquece. Novamente devido aos ventiladores, o ar quente é expelido pelas ranhuras existentes na cobertura do armário.



Figura 4.30 - Esquema do fluxo de ar no sistema de arrefecimento original do armário (Adaptado de Diogo, 2017).

4.5. Nota conclusiva

No capítulo que agora se encerra foram apresentadas, descritas e caracterizadas todos os equipamentos experimentais e respetivos equipamentos auxiliares empregues para a realização dos ensaios experimentais realizados no âmbito do presente estudo.

Relativamente ao estudo experimental que consistiu na medição da temperatura do solo em três locais diferentes, este teve como objetivo conhecer a evolução ao longo do tempo da temperatura do solo em função da profundidade.

Em relação aos restantes ensaios realizados, tiveram o intuito de estudar e analisar o desempenho térmico do permutador de calor ar-solo, enquanto o mesmo era utilizado para arrefecer um armário de telecomunicações externo, sem que este atingisse temperaturas superiores a 55 °C.

Capítulo 5

5. Análise e discussão dos resultados

Após a instalação das unidades experimentais necessárias para a realização dos ensaios, cujos detalhes e características foram apresentadas no capítulo anterior, estas foram sujeitas a um estudo experimental, sendo que, neste capítulo serão expostos e analisados os resultados obtidos.

Primeiramente, serão apresentados e analisados os resultados obtidos no estudo experimental referente à monitorização da temperatura do solo. Este teve como objetivo conhecer o padrão da temperatura apresentado pelo solo em função da profundidade, em cada localização.

Por fim, serão apresentados e analisados os resultados relativos aos ensaios com o armário de telecomunicações. Estes ensaios consistiram em proceder ao arrefecimento do armário através da utilização de um permutador de calor ar-solo, em circuito fechado, com o intuito de compreender se a sua utilização é uma boa prática quando se pretende diminuir a temperatura no interior do armário de telecomunicações. Com este estudo também é possível avaliar o desempenho térmico e energético do permutador de calor.

5.1. Monitorização da temperatura do solo

Com o intuito de conhecer o padrão da temperatura apresentado pelo solo, metro a metro, até aos 5 metros de profundidade, como referido na secção 4.4.1, foram realizados dois tipos de ensaios, um ensaio de ciclo diário e ensaios de ciclo “sazonal”, nas localizações A, B e C. Deste modo, os resultados obtidos são apresentados graficamente, dois gráficos por cada localização, em que cada gráfico é referente ao tipo de ensaio realizado. Importante reter, que, nos gráficos alusivos aos ensaios de ciclo “sazonal”, a profundidade 0 m é referente à temperatura do ar ambiente e os valores da temperatura em cada metro foram obtidos através da média das leituras efetuadas em todas as semanas do respetivo mês.

5.1.1. Monitorização semanal da temperatura do solo nos três locais

Apresentam-se na Figura 5.1 os dados obtidos nas leituras efetuadas semanalmente da temperatura do ar ambiente e do solo, metro a metro, até aos 5 metros de profundidade relativos à localização A - “Reitoria Baixo”.

Pela observação do gráfico apresentado na figura 5.1 é possível verificar que, nas profundidades mais baixas (até aos 3 m), a temperatura do solo apresenta maior variação com o tempo e é óbvio o carácter sazonal dessa variação, apresentando um regime menos estável. Assim, é visível que o solo tende a acompanhar as variações da temperatura ao longo do ano. Apesar disso, verifica-se que, a maiores profundidades (4 e 5 metros), o solo tende a apresentar uma amplitude térmica menor do que a profundidades mais reduzidas, o que denuncia claramente a redução da influência da temperatura ambiente a profundidades mais elevadas. Ou seja, a amplitude térmica anual vai diminuindo à medida que se aumenta a profundidade. Esta afirmação é comprovada com os valores apresentados, a título de exemplo, a 1 metro de profundidade. Neste caso, o solo apresentou uma amplitude térmica anual de 14,9 °C enquanto que a 5 metros verificou-se uma amplitude térmica de apenas 7,4 °C. Sendo que a temperatura mais elevada registada a 5 metros foi de 17,5 °C.

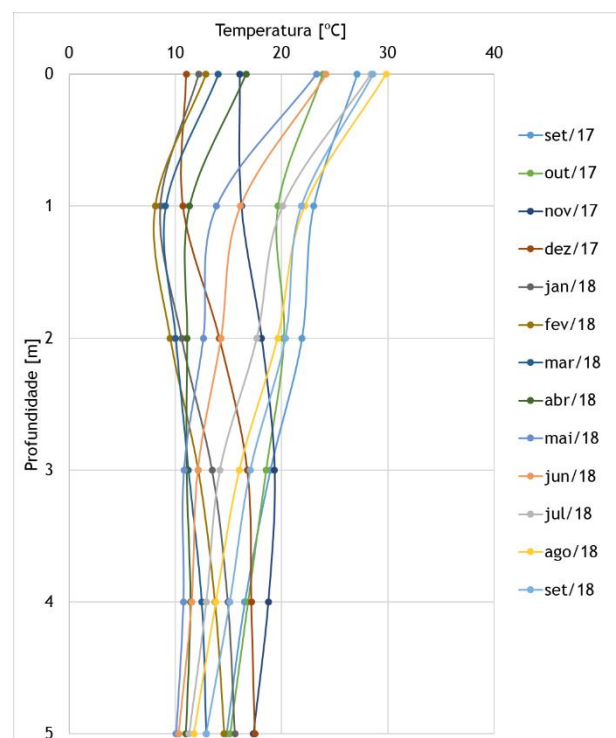


Figura 5.1 - Variação da temperatura do solo em relação à profundidade, de setembro de 2017 até setembro de 2018, no local A - “Reitoria Baixo”.

Exibem-se na Figura 5.2 os dados obtidos nas leituras efetuadas semanalmente da temperatura do ar ambiente e do solo, metro a metro, até aos 5 metros de profundidade relativos à localização B - “Reitoria Cima”.

Apesar da proximidade do local A e do local B, existem algumas diferenças nos dados obtidos, nomeadamente a profundidades mais reduzidas. Isso deve-se ao facto do local B ser abrangido por sombra proveniente das árvores existentes no local, ao invés do local A. Ainda assim, é

possível verificar uma variação da temperatura do solo, a baixas profundidades, devia às mudanças sazonais.

Neste local, a amplitude térmica anual a profundidades mais reduzidas, 1 metro, apresenta um valor de 9,9 °C, sendo que, a 5 metros, verificou-se uma amplitude térmica de 6,8 °C. Comparativamente ao local anterior, apresenta uma diferença de 5 °C, a 1 metro de profundidade, um valor relativamente significativo. Por outro lado, a temperatura mais elevada registada a 5 metros foi de 16,4 °C, cerca 1,1 °C mais baixa que a temperatura no local A, à mesma profundidade. À semelhança do sucedido no local anterior, com o aumento da profundidade a amplitude térmica tende a reduzir. O gráfico mostra uma tendência de uniformização da temperatura à medida que aumenta a profundidade.

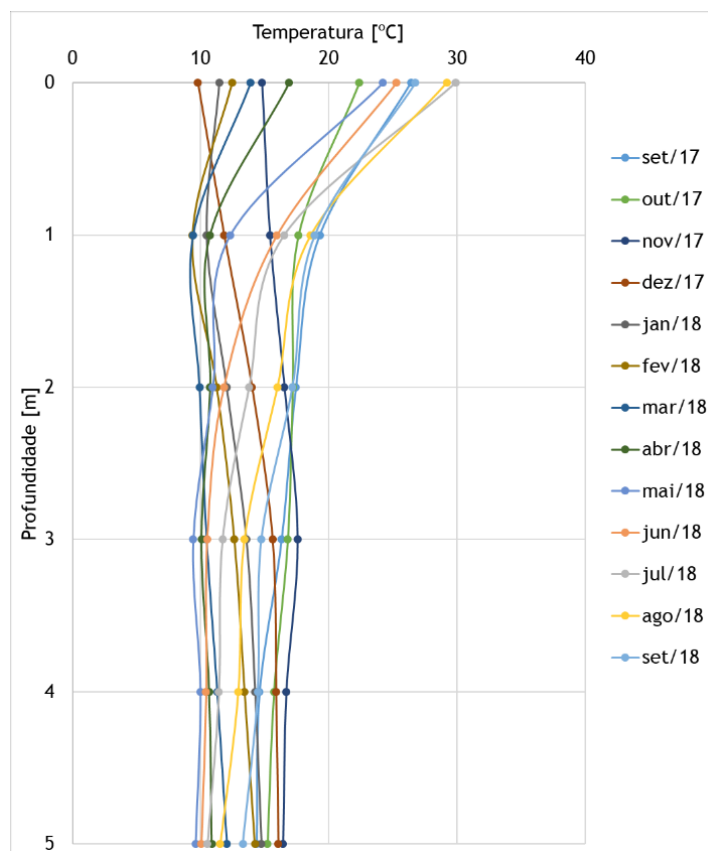


Figura 5.2 - Variação da temperatura do solo em relação à profundidade, de setembro de 2017 até setembro de 2018, no local B - “Reitoria Cima”.

O gráfico representado na Figura 5.3 apresenta os dados obtidos nas leituras efetuadas semanalmente da temperatura do ar ambiente e do solo, metro a metro, até aos 5 metros de profundidade relativos à localização C - “Engenharias”.

Através da observação do gráfico, é evidente que a dispersão de valores tende a diminuir com o aumento da profundidade, ou seja, à semelhança dos locais apresentados anteriores, a amplitude térmica tende a ser menor com o aumento da profundidade. Comparativamente aos

locais anteriores, constata-se que, neste local, o solo, a baixas profundidades, apresentou maior tendência a acompanhar as variações de temperatura exterior ao longo do ano. As temperaturas registadas a 1 metro e a 5 metros de profundidade foram as mais elevadas dos três locais. Por outro lado, apresenta a menor amplitude térmica a 5 metros de profundidade, cerca de 4,2 °C. Ao invés disso, a 1 metro de profundidade registou a maior amplitude térmica, cerca de 16.5 °C.

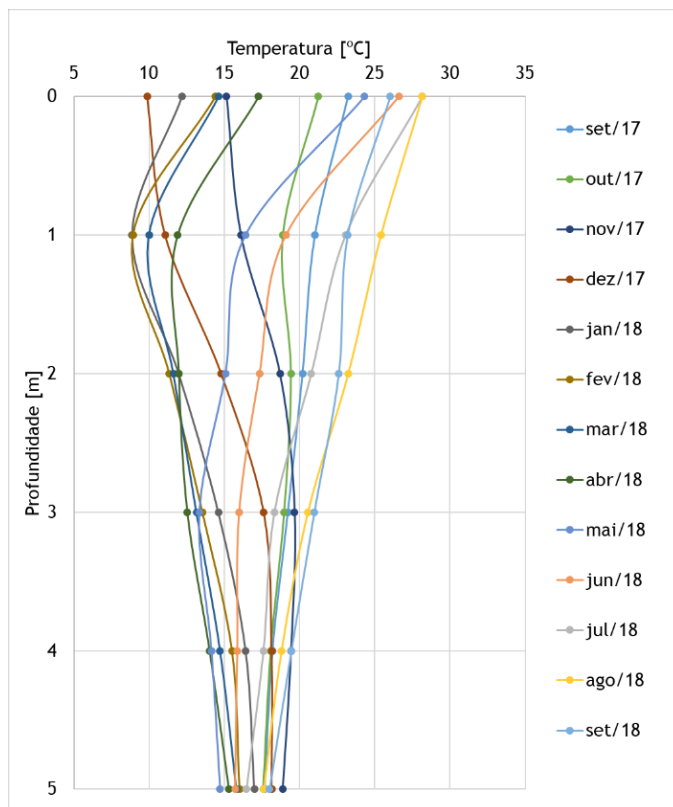


Figura 5.3 - Variação da temperatura do solo em relação à profundidade, de setembro de 2017 até setembro de 2018, no local C - “Engenharias”.

As diferenças na temperatura do solo entre os locais podem ter várias origens, nomeadamente, a diferença de altitudes entre cada local, a composição mineralógica e o conteúdo de água contida no solo. Estes fatores, como já foi mencionado anteriormente, influenciam as propriedades térmicas do solo, e, por sua vez, afetam a transferência de calor no mesmo.

Como referido na secção 4.4.1, as medições foram efetuadas entre as 12:00 e as 14:00. Devido a isso, os valores registados para as temperaturas exteriores são significativamente mais elevados do que seriam se as leituras fossem efetuadas, por exemplo, durante a noite. Nesse caso, seria mais evidente que, nos meses mais frios, o solo se encontraria a temperaturas mais elevadas que as temperaturas exteriores. Seria então mais claro o potencial de utilização do solo como fonte quente.

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

De seguida apresentam-se os dados obtidos, para as três localizações, relativos aos ensaios realizados para observar a variação da temperatura ambiente e do solo num período de 24 horas. Os resultados serão apresentados tendo em conta a sequência de realização dos mesmos. Assim, a Figura 5.4 apresenta o gráfico com os resultados obtidos no local C. Por sua vez, a Figura 5.5 exhibe o gráfico relativo ao ensaio realizado no local A e, por fim, a Figura 5.6 faz referência ao ensaio do local B.

Pelo conjunto dos gráficos pode observar-se que a curva representativa da temperatura exterior, ao longo de 24 horas, apresenta a mesma tendência em todos os locais, onde se pode visualizar que as temperaturas máximas foram atingidas no período das 14:00 e as 18:00, e as temperaturas mínimas foram registadas no período noturno. Da análise dos gráficos, verifica-se que a temperatura do solo em todas as profundidades se manteve constante ao longo das 24 horas, não sendo afetada pelas variações da temperatura exterior. Assim, verifica-se que, apesar da existência de picos, seja um máximo ou mínimo, na temperatura ambiente registada ao longo das 24 horas, o solo não demonstra instantaneamente essas alterações, nem à profundidade de 1 metro. De salientar que, apesar dos ensaios terem sido realizados em dias sequenciais, existiram algumas diferenças na amplitude térmica da temperatura ambiente registada em cada local, devido ao facto de terem ocorrido trovoadas nos dias em que foram realizados os ensaios.

Assim, e tendo em conta os ensaios de ciclo “sazonal”, em que se verificou que o solo tende a acompanhar as variações de temperatura ambiente ao longo do ano, especialmente nas profundidades menores, nestes ensaios constata-se que este acompanhamento não ocorre instantaneamente, ou seja, o solo apenas revela essas variações externas alguns dias depois, este efeito é explicado devido à elevada inércia térmica do solo.

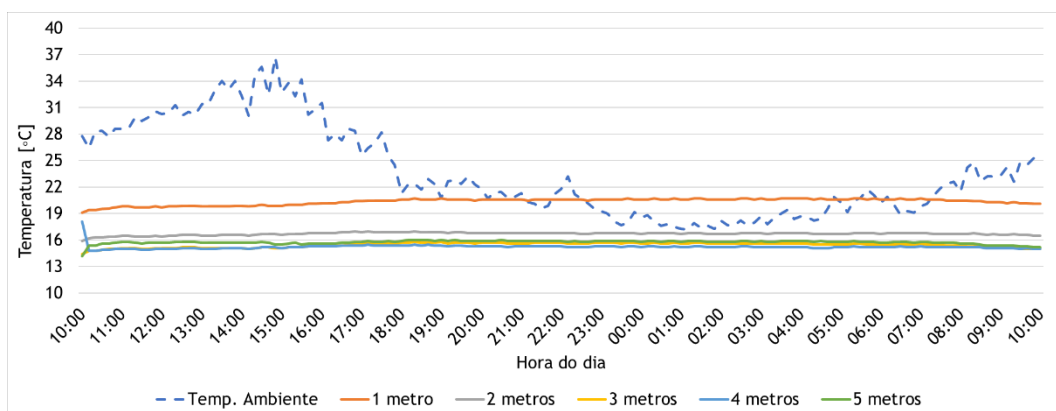


Figura 5.4 - Variação da temperatura do solo e da temperatura ambiente, de 20 de junho de 2018 a 21 de junho de 2018, no local C - “Engenharias”.

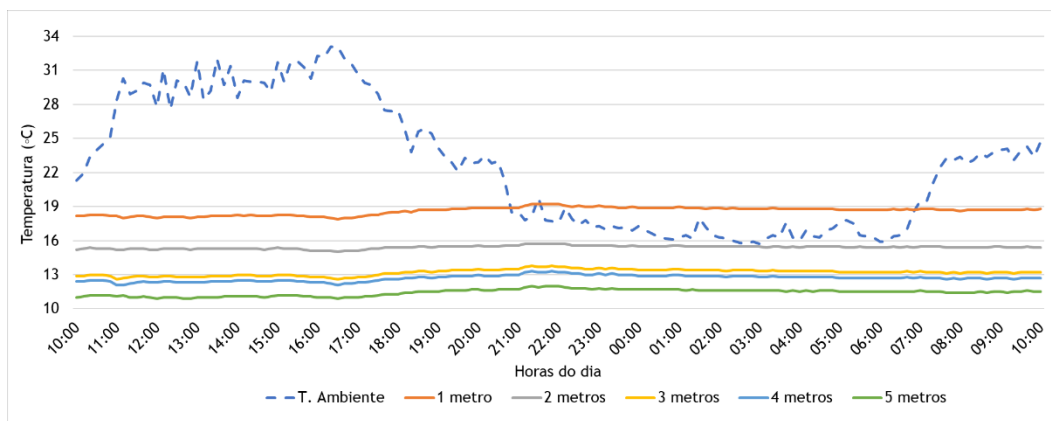


Figura 5.5 - Variação da temperatura do solo e da temperatura ambiente, de 21 de junho de 2018 a 22 de junho de 2018, no local A - “Reitoria Baixo”.

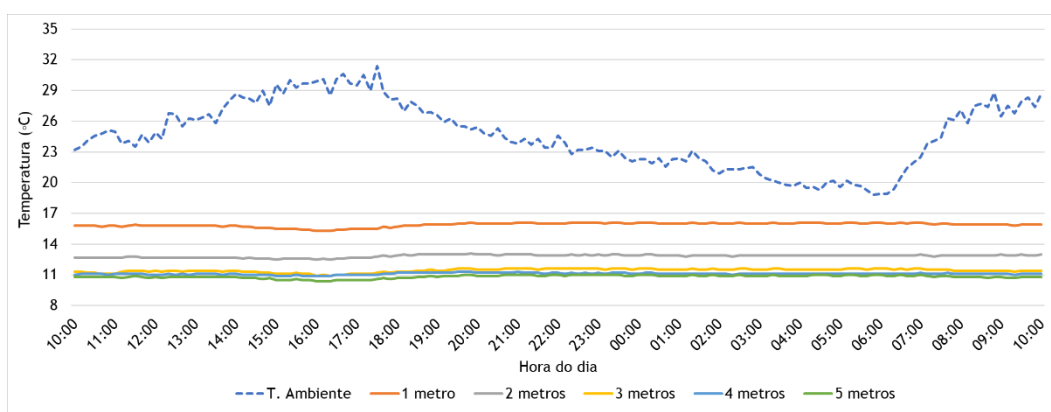


Figura 5.6 - Variação da temperatura do solo e da temperatura ambiente, de 22 de junho de 2018 a 23 de junho de 2018, no local A - “Reitoria Cima”.

5.2. Arrefecimento do armário de telecomunicações por meio do permutador de calor ar-solo

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados relativos aos ensaios realizados de forma a proceder ao arrefecimento do armário de telecomunicações por meio do permutador de calor ar-solo. Com o intuito de analisar a potencialidade da aplicação do permutador para o arrefecimento do armário, como já foi referido na secção 4.4.2, foram realizados no total 7 ensaios, divididos em dois grupos de três ensaios, cada grupo com um caudal diferente, e um individual relativo ao ensaio realizado com o sistema de arrefecimento original. Cada ensaio realizado teve a duração de 24 horas.

5.2.1. Temperatura no armário e no permutador de calor

Nos primeiros três ensaios realizados utilizou-se o ventilador auxiliar na sua potência máxima, obtendo um caudal volumétrico de 62,0 m³/h. Variou-se a carga térmica dissipada no interior

do armário, de ensaio para ensaio, de modo a perceber a evolução da temperatura no seu interior com o aumento da carga térmica. No primeiro ensaio a resistência elétrica gerou uma carga térmica de 150 W, por sua vez, no segundo ensaio a carga térmica teve o dobro do valor da anterior, 300 W e, por fim, no terceiro ensaio voltou-se a aumentar a carga térmica para 450 W, carga máxima utilizada no total dos ensaios.

A Figura 5.7 apresenta o gráfico com os resultados obtidos nestes três ensaios, onde são representadas a temperatura ambiente, a temperatura no interior do armário e ainda a temperatura a que o ar sai do permutador de calor, ou seja, a temperatura a que o ar é insuflado para o armário.

Nos três ensaios seguintes utilizou-se o ventilador com uma potência mais baixa, obtendo um caudal volumétrico de 55,7 m³/s. Neste grupo de ensaios, a variação da carga térmica realizou-se na ordem inversa à dos ensaios anteriores, aproveitando o facto do último ensaio realizado no grupo de ensaios anterior ter sido com a carga térmica mais elevada. Ou seja, começou-se pela carga térmica de 450 W e foi-se reduzindo o seu valor, de ensaio para ensaio até aos 150 W. A Figura 5.8 exhibe o gráfico com os resultados obtidos neste grupo de ensaios. Também, neste caso, são representadas a temperatura ambiente, a temperatura no interior do armário e a temperatura a que o ar sai do permutador.

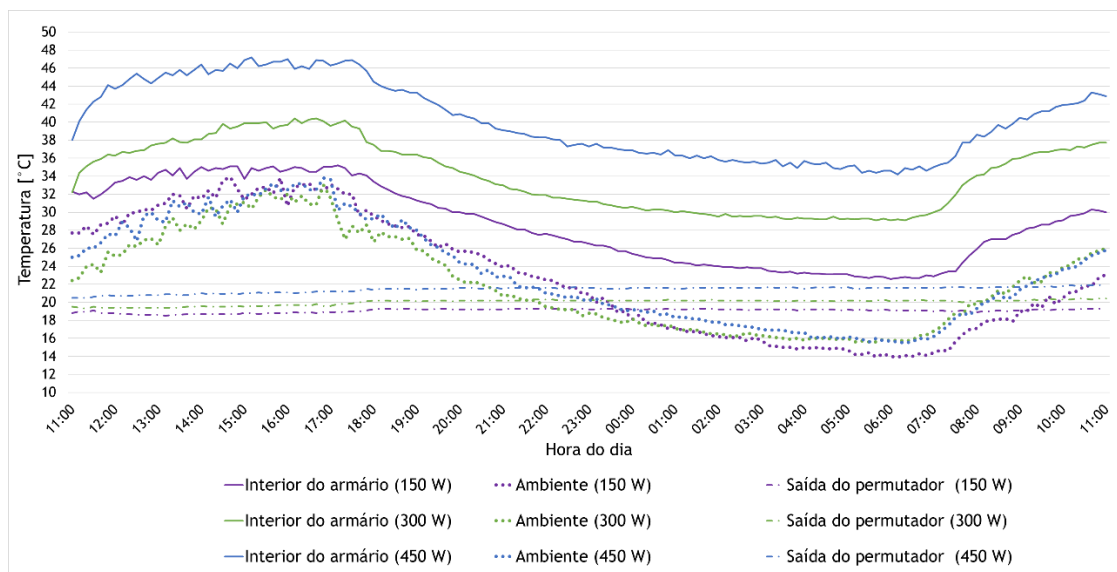


Figura 5.7 - Evolução da temperatura no armário e no permutador de calor para as diferentes cargas térmicas e para um caudal volumétrico de 62,0 m³/h.

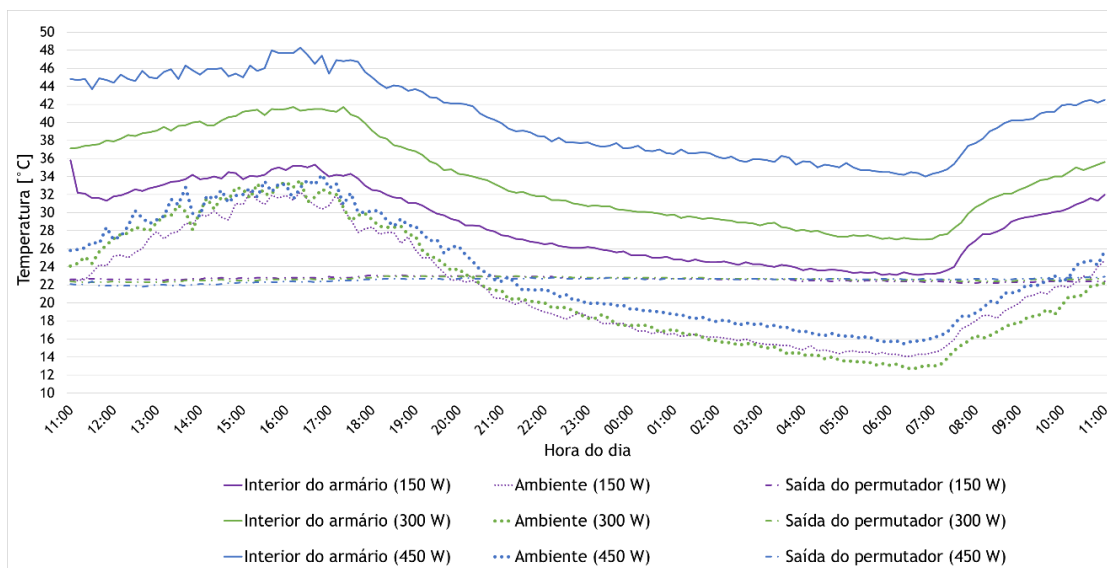


Figura 5.8 - Evolução da temperatura no armário e no permutador de calor para as diferentes cargas térmicas e para um caudal volumétrico de 55,7 m³/h.

Da análise dos gráficos observa-se que, com o aumento da carga térmica no interior do armário, a necessidade do seu arrefecimento também aumenta, o que já era previsível. Verifica-se ainda que existe maior necessidade de arrefecimento nos períodos em que a temperatura ambiente atinge os valores mais elevados, nomeadamente entre as 13:00 e as 18:00. Atendendo ao formato apresentado pelas curvas referentes à temperatura ambiente e à temperatura no interior do armário, nos diversos ensaios, verifica-se que a temperatura no interior do armário tende a acompanhar a variação da temperatura ambiente ao longo das 24 horas. Observa-se igualmente que a temperatura no interior do armário é sempre superior à temperatura ambiente, pelo que se justificaria o arrefecimento do armário em circuito aberto. Este facto será analisado com detalhe mais à frente, na secção 5.2.3.

Assim, com base nos resultados apresentados, conclui-se que a carga térmica dissipada no interior do armário associada às temperaturas exteriores registadas e à radiação solar incidente são os principais fatores que influenciam o aumento da temperatura no interior do armário. Apesar disso e, devido ao facto de o ar proveniente do armário ser arrefecido ao longo do permutador de calor, e ser novamente insuflado no armário, com uma temperatura mais reduzida, permitiu que a temperatura no interior do armário nunca chegasse e/ou ultrapassasse os 55 °C.

Como referido anteriormente, o caudal volumétrico de ar utilizado para proceder ao arrefecimento do armário foi diferente nestes dois grupos de ensaios. Tendo em conta que o caudal de ar insuflado foi superior nos primeiros três ensaios, verifica-se que não há grande alteração nas temperaturas registadas no interior do armário. Este facto pode ser justificado visto ser reduzida a diferença entre os dois caudais utilizados. A título de exemplo, para a carga

térmica dissipada de 450 W e um caudal de 55,7 m³/h, a temperatura máxima registada no interior do armário foi de 48,3 °C, para a mesma carga térmica e o caudal superior, 62,0 m³/h, registou-se uma temperatura máxima no interior do armário de 47,2 °C, representado uma melhoria de apenas 1,1 °C.

Relativamente aos dados obtidos da temperatura do ar à saída do permutador, verifica-se que esta também varia com a carga térmica dissipada no armário. Por sua vez, não apresenta grandes variações ao longo das 24 horas, permanecendo praticamente constante no decorrer de cada ensaio. Assim, constata-se que, para os primeiros três ensaios, as temperaturas mais elevadas registadas à saída do permutador são obtidas com a maior carga térmica, 450 W.

Nos restantes três ensaios, a variação da temperatura do ar à saída do permutador não é tão evidente consoante a carga térmica aplicada. Isso deve-se ao facto dos ensaios terem sido realizados na ordem inversa, no que se refere à carga térmica, ou seja, no primeiro ensaio a resistência elétrica gerou uma carga térmica de 450 W, por sua vez, no segundo ensaio a carga térmica foi de 300 W e, por fim, no terceiro ensaio a carga térmica teve metade do valor anterior, 150W. Por outro lado, também pode estar relacionado com a saturação térmica do solo no decorrer dos ensaios realizados anteriormente.

De modo a comparar e a verificar a existência de melhorias na utilização do permutador de calor para o arrefecimento do armário de telecomunicações foi realizado um ensaio com o sistema de arrefecimento original do armário. Neste ensaio foi utilizada a carga térmica intermédia, 300 W. Os ventiladores encastrados no armário, na sua potência máxima, foram os responsáveis por dissipar essa carga térmica gerada no seu interior. Neste ensaio o ar responsável pelo arrefecimento do armário era proveniente do exterior, ao invés dos ensaios anteriores em que o ar era proveniente do permutador de calor. Na Figura 5.9 estão representados graficamente os resultados obtidos após a realização deste ensaio.

À semelhança dos ensaios realizados anteriormente, também neste, verifica-se que a temperatura no interior do armário tende a acompanhar a variação da temperatura ambiente ao longo das 24 horas.

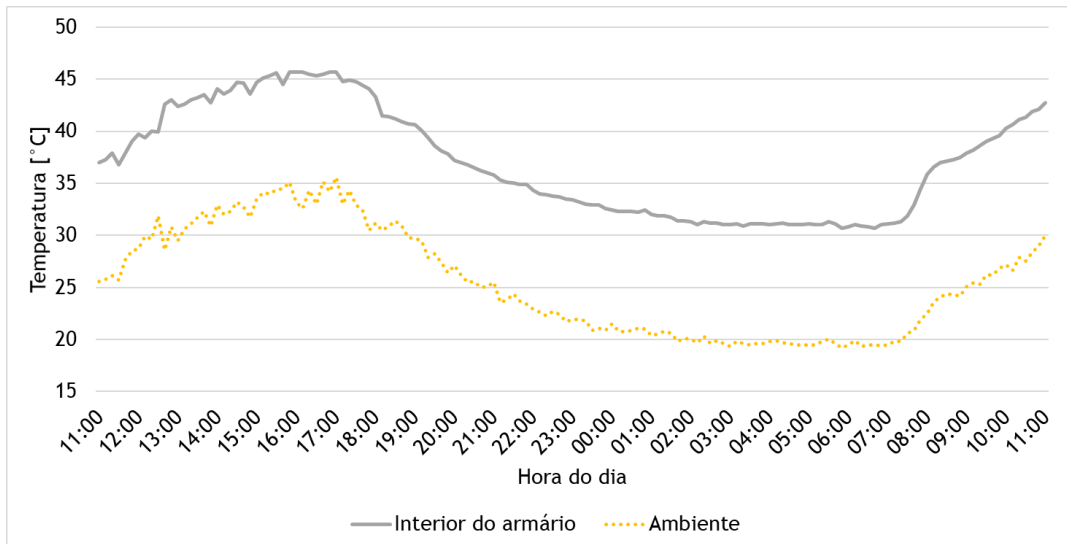


Figura 5.9 - Evolução da temperatura no armário e da temperatura ambiente para carga térmica de 300 W, utilizando o sistema de arrefecimento original do armário.

Na Figura 5.10 exibe o gráfico com os resultados obtidos em todos os ensaios realizados com uma carga térmica de 300 W. Também, neste caso, são representadas a temperatura ambiente, a temperatura no interior do armário e a temperatura a que o ar saí do permutador (nos ensaios em que foi utilizado). As linhas denominadas de; ambiente (original) e interior do armário (original), são referentes ao ensaio realizado com o sistema de arrefecimento original do armário.

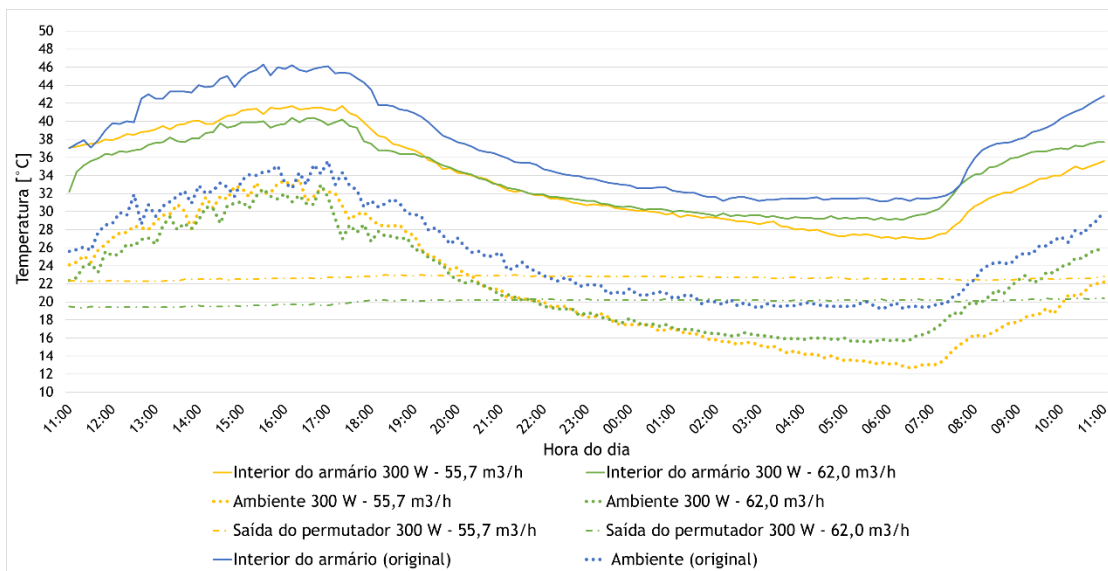


Figura 5.10 - Evolução da temperatura no armário, no permutador de calor e da temperatura ambiente para os ensaios com carga térmica de 300W.

Comparando todos os ensaios realizados com a mesma carga térmica dissipada, o ensaio com o sistema de arrefecimento original apresentou temperaturas no interior do armário superiores

às registadas nos ensaios onde o arrefecimento do armário era realizado recorrendo ao permutador de calor. Analisando o gráfico, verifica-se que a temperatura máxima no interior do armário, aquando da utilização dos ventiladores do mesmo foi de 46,3 °C, uma temperatura superior às registadas nos ensaios com o permutador, onde se obtiveram valores de 40,4 °C e 41,7 °C, para os ensaios com caudal volumétrico de 62,0 m³/h e 55,7 m³/h, respetivamente. Apresentando, portanto, uma melhoria significativa pela utilização do permutador de calor-ar solo no arrefecimento do armário.

5.2.2. Potência de arrefecimento

A potência de arrefecimento, instantânea, foi obtida aplicando a expressão matemática (3.2), que se encontra apresentada na secção 3.2.3 da presente dissertação. Para o seu cálculo foi considerada a temperatura à saída do armário e a temperatura do ar à saída do permutador. Em relação aos valores da massa específica do ar (ρ) e o calor específico (c_p), estes foram obtidos, para cada instante, recorrendo a uma interpolação linear dos valores destas grandezas provenientes de Incropera (1996), considerando a temperatura média da saída do armário e da saída do permutador.

O coeficiente de desempenho, *COP*, também instantâneo, foi calculado com base na expressão (3.6), que se encontra apresentada na secção 3.2.3 da presente dissertação.

Nas Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13 apresenta-se a evolução dos valores instantâneos da potência de arrefecimento e do COP da instalação. O primeiro gráfico é referente aos ensaios com carga térmica de 150 W, o segundo gráfico refere-se aos ensaios onde a carga térmica foi 300 W, por fim, o terceiro gráfico é relativo aos ensaios realizados com uma carga térmica de 450 W. Cada gráfico apresenta valores relativos aos dois ensaios realizados com diferentes caudais de ar.

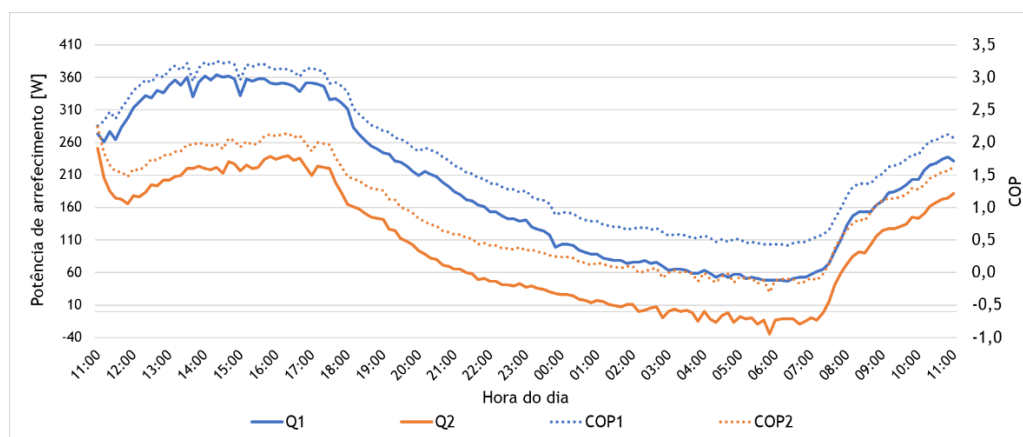


Figura 5.11 - Potência de arrefecimento e *COP* da instalação nos ensaios com carga térmica 150 W (Q1 e COP1 são referentes ao ensaio com caudal 62,0 m³/h e Q2 e COP2 são referentes ao ensaio com caudal de 55,7 m³/h).

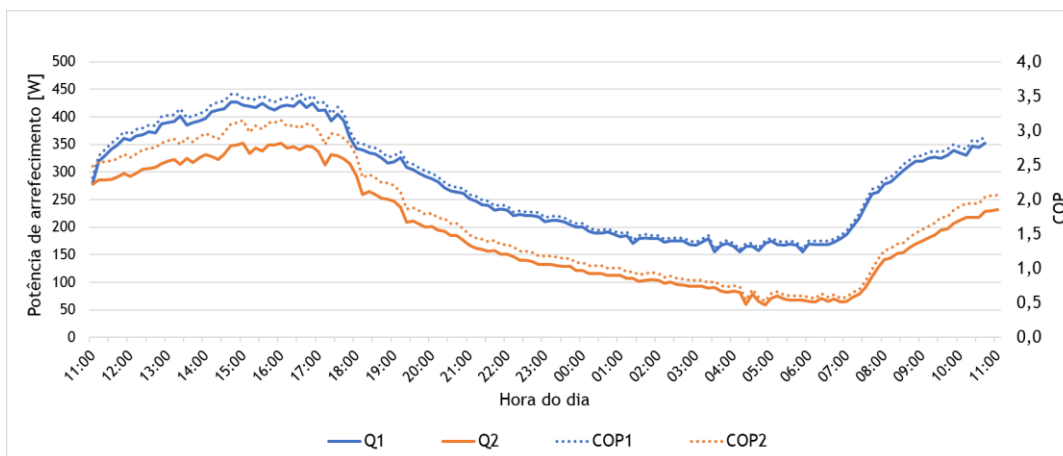


Figura 5.12 - Potência de arrefecimento e *COP* da instalação nos ensaios com carga térmica 300 W (Q1 e COP1 são referentes ao ensaio com caudal $62,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e Q2 e COP2 são referentes ao ensaio com caudal de $55,7 \text{ m}^3/\text{h}$).

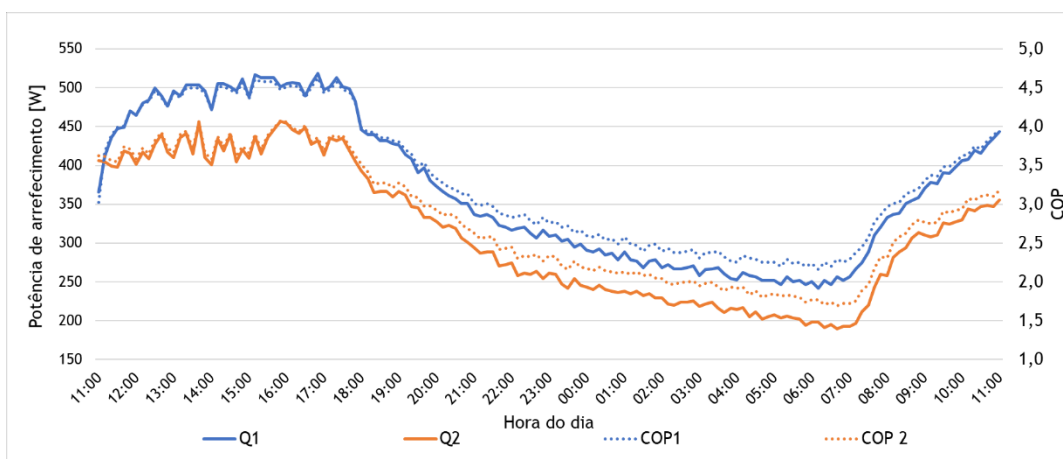


Figura 5.13 - Potência de arrefecimento e *COP* da instalação nos ensaios com carga térmica 450 W (Q1 e COP1 são referentes ao ensaio com caudal $62,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e Q2 e COP2 são referentes ao ensaio com caudal de $55,7 \text{ m}^3/\text{h}$).

Da análise dos gráficos e, tendo em conta o que se observou nos gráficos apresentados na secção anterior, onde a temperatura à saída do permutador é praticamente constante ao longo das 24 horas de cada ensaio, conclui-se que a variação destes dois parâmetros tendem a acompanhar a variação da temperatura à saída do armário, visto que o caudal mássico, o calor específico e a massa específica do ar não apresentam variações significativas.

Relativamente aos dados apresentados nos gráficos, verifica-se que as maiores potências de arrefecimento foram obtidas nos ensaios em que foi utilizado o caudal volumétrico de $62,0 \text{ m}^3/\text{h}$, designados como Q1. Por outro lado, observa-se que o *COP* mais elevado foi de 4,6 no ensaio com uma carga térmica dissipada de 450 W e um caudal volumétrico de $62,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Apesar disto, não foram obtidos valores de *COP* superiores visto que, a potência elétrica do

ventilador não se traduzir num significativo caudal volumétrico, devido à existência de uma enorme perda de caudal, comparando o caudal nominal e o caudal real durante os ensaios. Relembrar que o ventilador utilizado permite um caudal em vazio de 1000 m³/h, para uma potência máxima de 121 W. Nos ensaios realizados com o ventilador a funcionar na sua potência máxima, o caudal máximo obtido foi apenas de 62 m³/h, cerca de 16 vezes inferior ao valor sem carga.

Também se observa que durante a aplicação de cargas térmicas mais baixas, 150 W, com o caudal de 55,7 m³/h, obtiveram-se potências de arrefecimentos instantâneas negativas, o que significa que o ar que saía do permutador mais quente do que entrava, o inverso do que pretendia. Este fenómeno pode ser explicado devido ao facto deste ensaio ter sido o último a ser realizado, no qual, o solo, apresentou uma temperatura média 3,6 °C superior à temperatura média do solo no primeiro ensaio.

5.2.3. Diferença de temperatura entre o ambiente e o interior do armário

Uma das principais questões a considerar e analisar quando se estuda um sistema de arrefecimento por meio de um permutador de calor em circuito fechado, como é o caso desta dissertação, é a diferença de temperatura entre o ar exterior e o interior do armário.

Na Figura 5.14 apresenta-se o gráfico referente à diferença de temperatura entre o ambiente e ar que sai do armário, para todos os ensaios realizados em que o arrefecimento do armário foi efetuado recorrendo ao permutador de calor. A primeira informação que se pode retirar pela observação do gráfico é que quanto maior é a carga térmica dissipada no interior do armário maior é a diferença de temperatura entre o exterior e o interior do armário.

Atendendo aos gráficos apresentados na subsecção 5.2.1, e cruzando essa informação com aquela agora apresentada, verifica-se que, quando a temperatura ambiente é mais elevada, a diferença entre esta e a temperatura no interior do armário é menor (lado esquerdo do gráfico), ou seja, estas temperaturas encontram-se mais próximas uma da outra. Ao invés, no período em que ambas as temperaturas atingem o seu mínimo (lado direito do gráfico), obtém-se uma diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura no interior do armário mais elevada. Isso deve-se ao facto da temperatura ambiente, em alguns momentos desse período, atingir valores mais baixos do que a temperatura do ar à saída do permutador, o que faz com que a temperatura do ar insuflado no armário seja superior à temperatura do ar exterior. Nesta situação, seria benéfico insuflar o ar ambiente para o interior do armário, ao invés do ar proveniente do permutador. Assim, possivelmente, a temperatura no interior do armário seria menor.

Também se observa que a variação do caudal, para a mesma carga térmica, não apresenta grande influência no que se refere à diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura

no interior do armário. Os ensaios que apresentam maior diferença, entre os dados representados neste gráfico, são os ensaios realizados com a menor carga térmica. Isso justifica-se devido ao facto destes dois ensaios terem sido realizados com 4 dias de diferença, e de, no último ensaio, o solo já apresentar uma certa saturação térmica e, conseqüentemente, conduzir a que a temperatura do ar que sai do permutador ser já mais elevada.

Atendendo à informação apresentada anteriormente, referente à potência de arrefecimento instantânea, verifica-se que quando a diferença de temperatura entre o ambiente e o interior do armário é menor a potência de arrefecimento é maior, e vice-versa. Ou seja, o período em que se registaram as temperaturas mais elevadas nos dois espaços, coincide, com o período em que as necessidades de arrefecimento são mais elevadas. Verifica-se, assim, que o permutador respondeu positivamente, conseguindo dissipar a carga térmica proveniente do interior do armário. A título de exemplo, no ensaio com a carga térmica de 450 W e caudal de 62,0 m³/h, a potência de arrefecimento mais elevada foi obtida às 17:00, coincidindo com a menor diferença de temperatura para esse ensaio, 12,7 °C.

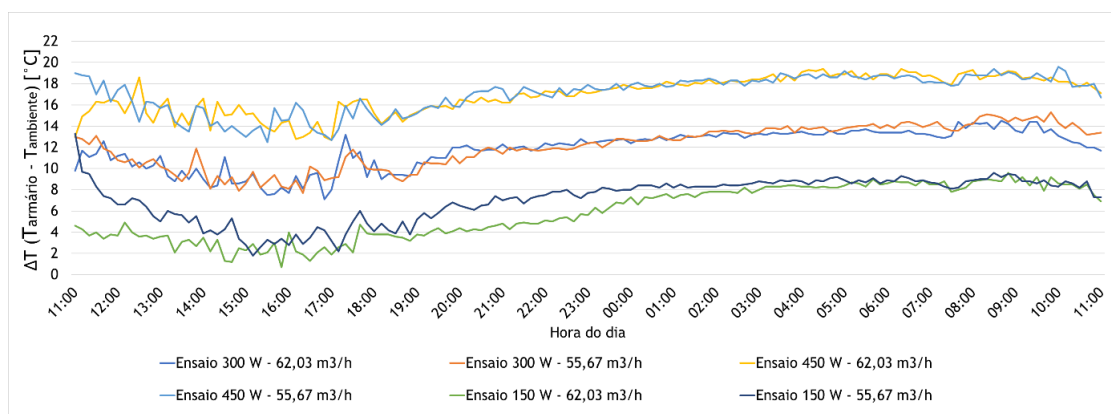


Figura 5.14 - Diferença entre a temperatura no interior do armário e temperatura ambiente.

O gráfico apresentado na Figura 5.15, compara a diferença de temperatura entre o interior do armário e o ambiente para todos os ensaios realizados com uma carga térmica de 300 W, nomeadamente, o ensaio com um caudal de 62,0 m³/h, o ensaio com um caudal de 55,7 m³/h e, por último, o ensaio realizado com os ventiladores do armário. Neste último, verifica-se que nos períodos em que a diferença de temperaturas é mais elevada (lado esquerdo do gráfico) também a temperatura ambiente apresenta os seus valores mais elevados. Repare-se que, comparativamente aos ensaios realizados com o permutador de calor, nesse mesmo período, a diferença de temperaturas é mais elevada no ensaio onde foram utilizados os ventiladores do armário. Tendo em conta que as condições meteorológicas foram idênticas em ambos os ensaios, essa ocorrência deve-se ao facto de, com o permutador de calor, as temperaturas mais elevadas registadas no interior do armário serem inferiores às temperaturas máximas registadas, no mesmo espaço, com os ventiladores do armário.

Por sua vez, no período das 23:00 às 10:00, a diferença de temperatura é menor quando se utilizaram os ventiladores do armário, comparativamente aos ensaios realizados com o permutador. Esse período coincide com o período em que a temperatura ambiente apresenta os seus valores mínimos, inferiores à temperatura registada à saída do permutador. Atendendo ao facto de que a temperatura no interior do armário, nos três ensaios, durante este período, não apresentou grandes variações relativamente ao tipo de sistema de arrefecimento utilizado, verifica-se que nos dias em que se realizaram os ensaios com o permutador de calor a temperatura ambiente mínima foi muito menor do que no dia em que se realizou o ensaio com os ventiladores do armário. Daí os ensaios com o permutador apresentarem diferenças de temperatura mais elevadas do que o ensaio com os ventiladores. A título de exemplo, chegou-se a registar uma diferença de 6,6 °C, entre as temperaturas mínimas ambiente do ensaio com o permutador de calor e um caudal de 55,7 m³/h e o ensaio com os ventiladores do armário.

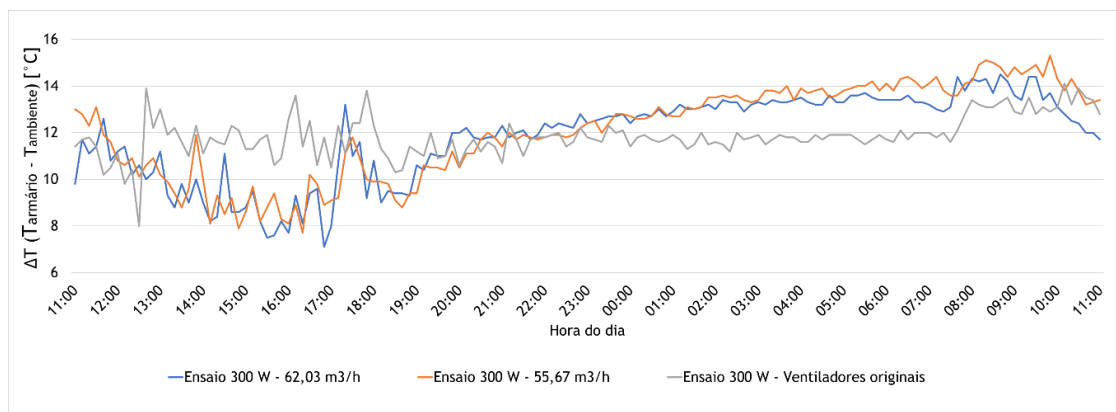


Figura 5.15 - Diferença entre a temperatura no interior do armário e a temperatura ambiente, para todos os ensaios realizados com uma carga térmica de 300W.

Assim, através dos dados apresentado revela-se uma grande diferença entre a temperatura no interior do armário e a temperatura exterior. Tendo em conta que a temperatura do ar que entra no permutador de calor é praticamente igual à temperatura registada no interior do armário, verifica-se que a temperatura à entrada do permutador é muito superior à temperatura do ar ambiente. Pelo que, de modo a melhorar a eficiência deste sistema seria mais vantajoso insuflar o ar ambiente no permutador de calor e posteriormente proceder ao arrefecimento do armário, ou seja, utilizar o sistema de arrefecimento através do permutador de calor em circuito aberto, ao invés da configuração utilizada em circuito fechado.

5.3. Nota conclusiva

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos dois estudos experimentais realizados, nomeadamente o estudo referente à monitorização da temperatura do solo, em três localizações, e o estudo relativa à utilização de um permutador de calor ar-solo para proceder

ao arrefecimento de um armário de telecomunicações. Para cada um destes estudos foram apresentados os ensaios realizados e, posteriormente, analisados os resultados obtidos.

Os ensaios relacionados com a monitorização da temperatura do solo nas três localizações, A, B e C, tiveram como finalidade conhecer a variação da temperatura do solo em função da profundidade e do tempo. Assim, foram realizados dois tipos de ensaios, uns durante um período de 24 horas e outros numa base “sazonal”.

Os resultados destes ensaios demonstram que a temperatura nas profundidades mais superficiais do solo tende a variar consoante as condições exteriores, sendo que estas variações não ocorrem instantaneamente. Observou-se que no verão o solo apresentou temperaturas inferiores à temperatura ambiente, por sua vez, no inverno, o solo, apresentou temperaturas superiores à temperatura ambiente. Verificou-se ainda que a amplitude térmica tende a diminuir com o aumento da profundidade em todos os locais e que a temperatura a qualquer profundidade tende a permanecer constante ao longo de 24 horas.

Relativamente aos ensaios que permitiram o estudo do arrefecimento de um armário de telecomunicações através de um permutador de calor, tiveram como finalidade compreender se a utilização de um permutador de calor ar-solo, em circuito fechado, permitia diminuir a temperatura no interior do armário comparativamente ao sistema de arrefecimento original. Para tal foram realizados vários ensaios com diferentes cargas térmicas dissipadas no seu interior, de forma a perceber a sua influência na temperatura do interior do armário.

Os resultados destes ensaios demonstram que, com a utilização do permutador de calor ar-solo, é possível reduzir a temperatura no interior do armário comparativamente ao seu sistema de arrefecimento original. Verificou-se ainda que a temperatura no interior do armário foi sempre superior temperatura exterior, o que indica que o arrefecimento do armário seria mais eficaz se fosse realizado em circuito aberto, ao invés da sua utilização em circuito fechado.

De salientar que em nenhum dos ensaios realizados, quer com o arrefecimento através do permutador de calor ar-solo, quer com o sistema de arrefecimento original, nunca se atingiram temperaturas iguais ou superiores a 55 °C.

Capítulo 6

6. Conclusão

Nos últimos anos, o sector das tecnologias da informação e comunicação (TIC) tem sido alvo de diversos trabalhos de investigação no âmbito da utilização de energias renováveis, da conservação de energia e da eficiência energética. Nesse contexto, a presente dissertação teve como principal objetivo o estudo experimental de um método passivo para o arrefecimento de um armário de telecomunicações. Este método baseia-se na utilização de um permutador de calor ar-solo. A par deste trabalho foi realizada a monitorização da temperatura do solo, metro a metro, até aos 5 metros, em três localizações da cidade da Covilhã.

Neste último capítulo, será realizada uma revisão do trabalho desenvolvido e apresentar-se-ão algumas sugestões para trabalhos futuros.

6.1. Recapitulação

As telecomunicações, em geral, e as comunicações móveis, em particular, têm revelado uma enorme importância e relevância na vida da sociedade em geral. Consequentemente, o tráfego de dados móveis tem crescido exponencialmente motivando o aumento do número de instalações de telecomunicações móveis. De modo a garantir a adequada prestação e cobertura geográfica do serviço, as empresas fornecedoras destes serviços são forçadas a adquirir mais equipamentos e dispositivos que assegurem a pronta prestação desses serviços, com a adequada cobertura geográfica. Entre os dispositivos que constituem as redes de comunicação móveis, encontram-se os armários onde são alojados os equipamentos de telecomunicações.

A principal função dos armários de telecomunicações é proteger os equipamentos de telecomunicações, bem como garantir uma temperatura adequada durante o seu funcionamento. Por isso, de forma a que a temperatura no interior do armário de telecomunicações permaneça inferior a 55 °C, estes armários estão equipados com sistemas de arrefecimento. Geralmente, estes sistemas são compostos por ventiladores que forçam o ar aquecido pelos equipamentos de telecomunicações, a sair pelas ranhuras do armário, ou podem utilizar sistemas convencionais de ar-condicionado. Esta solução apresenta um custo de manutenção e um consumo energético elevado, podendo consumir cerca de 30% a 50% da eletricidade total da instalação.

Face a este problema, analisou-se a possibilidade de utilizar o solo como fonte térmica, aproveitando a potencialidade que este possui para ser utilizado na climatização (aquecimento

e arrefecimento) de diferentes espaços. A temperatura a uma determinada profundidade tende a permanecer constante ao longo do ano, sendo que a amplitude térmica tende a diminuir com o aumento da profundidade. Assim, no verão o solo apresenta temperaturas inferiores à temperatura ambiente. Por sua vez, no inverno, demonstra o inverso, ou seja, o solo apresenta temperaturas superiores à temperatura ambiente.

Posto isto, foi estudado um método de arrefecimento passivo para o arrefecimento de um armário de telecomunicações, que se baseia na utilização de um permutador de calor ar-solo em circuito-fechado. O permutador apresenta uma tubagem com um diâmetro de 7,5 cm, um comprimento de 29 m, aproximadamente, e encontra-se enterrado a uma profundidade máxima de 3 m. Foi contruído em tubo e acessórios de PVC, com um diâmetro externo de 0,075 m. O armário de telecomunicações utilizado nos ensaios realizados foi disponibilizado pela empresa Viatel e já é uma segunda versão desta tipologia, ABE_V2. Este armário foi alvo de algumas intervenções de modo a permitir a acoplação ao permutador de calor ar-solo, e foi, ainda, instalada uma resistência elétrica no seu interior, de modo a dissipar uma quantidade de calor equivalente à gerada pelos dispositivos eletrónicos.

A realização deste estudo teve por base a execução de sete ensaios, com a duração de 24 horas cada, sempre em período de verão. Os ensaios podem ser divididos, essencialmente, em dois grupos de três ensaios e um ensaio individual. O arrefecimento do armário nos dois grupos foi realizado recorrendo ao permutador de calor. Por sua vez, no ensaio individual, o arrefecimento foi obtido através dos ventiladores que equipam o armário na sua configuração original.

No primeiro grupo de ensaios, foi utilizado um caudal volumétrico de ar de 62,0 m³/h, fornecido por um ventilador auxiliar, e a carga térmica dissipada no interior do armário foi alterada de ensaio para ensaio. Assim, as cargas térmicas utilizadas foram 150 W, 300 W e 450 W, consecutivamente. No segundo grupo de ensaios, foi utilizado um caudal volumétrico de ar de 55,7 m³/h, e a variação da carga térmica realizou-se na ordem inversa dos ensaios anteriores, ou seja, começou-se pela carga térmica de 450 W e foi-se reduzindo o seu valor, de ensaio para ensaio, até aos 150 W. Por fim, o último ensaio foi realizado com uma carga térmica dissipada no interior do armário de 300 W, mas com o sistema de arrefecimento original do armário. A realização deste ensaio teve como intuito poder comparar os dados obtidos, relativos à temperatura no interior do armário, com os dois sistemas de arrefecimento.

Após a análise dos resultados obtidos, conclui-se que o permutador de calor ar-solo pode ser utilizado como sistema de arrefecimento de armários de telecomunicações. Através da aplicação do permutador de calor ar-solo, para uma carga térmica dissipada de 300 W, e comparativamente ao sistema de arrefecimento original, foi possível, num determinado instante, reduzir a temperatura no interior do armário em 4,6 °C com um caudal de ar de 55,7 m³/h e 5,9 °C, com um caudal de ar de 62,0 m³/h.

6.2. Sugestão para trabalho futuro

Finalizado o trabalho em causa e através do conhecimento adquirido durante a sua realização, sugerem-se novos trabalhos a desenvolver futuramente, relacionados com o contexto do presente trabalho.

Tendo como objetivo promover a sustentabilidade energética do sistema de arrefecimento de um armário de telecomunicações através do permutador de calor ar-solo, propõem-se o acoplamento de painéis fotovoltaicos (PV), com o objetivo de mitigar o consumo energético da unidade de ventilação.

Por outro lado, propõe-se o estudo da utilização do permutador de calor ar-solo para aquecimento do armário, em localidades onde se registem temperaturas exteriores negativas.

Propõe-se ainda uma análise económica da implementação deste sistema a uma maior escala de modo a analisar os custos de implementação e manutenção, bem como o tempo de retorno do investimento.

Por fim, propõe-se a realização de ensaios com o permutador de calor ar-solo como sistema de arrefecimento do armário de telecomunicações em circuito aberto, de forma a quantificar o desempenho do permutador nessa situação.

Referências bibliográficas

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

Ahmadi, M., Gholami, A., e Bahrami, M., *Passive Cooling of Outside Plant Power Systems, a Green Solution to Reduce Energy Consumption*, IEEE - 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2014.

Ahmed, F., Naeem, M., Ejaz, W., Iqbal, M., e Anpalagan, A., *Resource management in cellular base stations powered by renewable energy sources*, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 112, pp. 1-17, 2018.

ASHRAE, Comité Técnico (TC) 9.9, *IT Equipment Thermal Management and Controls*, ASHRAE 9.9 Mission Critical Facilities, Technology Spaces, and Electronic Equipment, 2012.

Aydin, M., Gültekin, A., Sisman, A., e Dehghan, B., *Experimental and computational performance comparison between diferente shallow ground heat exchangers*, *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, pp. 19-25, 2015.

Azevedo, P., *Manual de FTL - Sistemas de comunicação móveis*, CINEL - Centro de Formação Profissional da Indústria Eletrónica, pp. 110.

Bachmann, J., Horton, R., Ren, T., e Van der Ploghe, R. R., *Comparison of the termal properties of four wettable and four water-repellent soils*, *Soil Science Society of America Journal* (6), Vol. 65, pp. 1675-1679, 2001.

Blume, O., Eckhardt, H., Klein, S., Kuehn, E., e Wajda, W. M., *Energy savings in mobile networks based on adaptation to traffic statistics*, *Nokia Bell Labs*, Vol. 15, pp. 77-94, 2010.

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

Bryś, K., Bryś, T., Sayegh, M., e Ojrzyńska, H., *Subsurface shallow depth soil layers thermal potential for ground heat pumps in Poland*, *Energy and Buildings*, Vol. 165, pp. 64-75, 2018.

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

Calado, A., *Monitorização da temperatura do solo. Desenvolvimento e estudo experimental de um permutador de calor ar-solo*, Dissertação para obtenção do grau mestre em Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2016.

Chen, Y., Zhang, Y., e Men, Q., *Study of ventilation cooling technology for telecommunication base stations: Control strategy and application strategy*, Energy and Buildings, Vol. 50, pp. 212-218, 2012.

Chiaraviglio, L., Ciullo, D., Mellia, M., e Meo, M., *Modeling sleep mode gains in energy-aware networks*, Project-Teams Maestro, Research Report n° 8187, pp. 28, 2013.

Chua, K. J., Chou, S. K., Yang, W.M., e Yan, J., *Achieving better energy-efficient air conditioning-a review of technologies and strategies*, Applied Energy, Vol. 104, pp. 87-104, 2013.

D'Aniello, F., Sorrentino, M., Rizzo, G., Trifirò, A., e Bedognib, F., *Introducing innovative energy performance metrics for high-level monitoring and diagnosis of telecommunication sites*, Applied Thermal Engineering, Vol. 137, pp. 277-287, 2018.

De Paepe, M. e Janssens, A., *Thermo-Hydraulic Design of Earth-Air Heat Exchangers*, Energy and Buildings, Vol. 35, pp. 389-397, 2003.

Delgado, C., Estudo experimental e simulação computacional do escoamento interior num armário de telecomunicações, Dissertação para obtenção do grau mestre em Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2016.

Diogo, D., *Aplicação de um permutador de calor ar-solo no arrefecimento de um armário de telecomunicações*, Dissertação para obtenção do grau mestre em Engenharia Eletromecânica, Universidade da Beira Interior, Portugal, 2017.

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

Dong, Y., McCartney, J. S., e Lu, N. Critical review of thermal conductivity models for unsaturated soils, Geotech Geol Eng (2), Vol. 33, pp. 207-221, 2015.

EBM PAPST, 4318 DC axial compact fan, 2018. Disponível em: https://www.ebmpapst.com/en/products/product_search/productdetailaxialcompact.php?plD=54101

Ebrahim, K., Jones, G. F., e Fleischer, A. S., *Thermo-economic analysis of steady state waste heat recovery in data centers using absorption refrigeration*, Applied Energy, Vol. 139, pp. 384-397, 2015.

Ericsson, *ERICSSON MOBILITY REPORT*, Ericsson, Estocolmo, Suécia, 2018.

Ericsson, *RBS Description*, RBS 6601, Ericsson AB, 2010.

Ericsson, *Sustainable energy use in mobile communications*, White Paper, 2007.

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

Faruk, N., Ayeni. A. A., Muhammad, M. Y., Olawoyin, L. A., Abdulkarim, A., Agbakoba, J., e Olufemi, M. O., *Techniques for minimizing power consumption of base transceiver station in mobile cellular systems*, International Journal of Sustainability, Vol. 2, 2013.

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

Fluke, *Model 175, 177 & 179 True RMS Multimeters - Users Manual*, Fluke Corporation, Washington, EUA, 2008.

Gillan, P. A., *Fresh air-natural asset telecommunication equipment cooling*, IEEE - 24th Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2002.

Gouvea, R., Kapelianis, D., e Kassicieh, S., *Assessing the nexus of sustainability and information & communications technology*, Technological Forecasting & Social Change, Vol. 130, pp. 39-44, 2018.

Hassan, H. A. H., Nuaymi, e L., Pelov, A., *Renewable Energy in Cellular Networks: a Survey*, IEEE Online Conference on Green Communications (OnlineGreenComm), pp. 1-7, 2013.

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

Hong, Y., Li, Y. e Shi, J., *Geothermal Cooling Solution Research For Outdoor Cabinet*, IEEE - 15th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), 2009.

Huawei, *BBU3900 Description*, Huawei Technologies CO., Ltd., Shenzhen, China, 2012.

Huawei, *Energy savings creates Profit, Reduces OpEx*, Green Power For Mobile, 2011.

Incropera, F. P., e DeWitt, D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th edition, 1996.

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

Johansen, O., Thermal conductivity of soils, Ph.D. thesis, Trondheim, Norway: University of Trondheim: United States Army Corps of Engineers - Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Draft English Translation 637, pp. 291, 1975.

Kaushal, M., *Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies: Comprehensive review*, Energy and Buildings, Vol. 139, pp. 634-652, 2017.

Lai, Y., Pei, W., Zhang, M., e Zhou, J., Study on theory model of hydro-thermal-mechanical interaction process in saturated freezing silty soil, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 78, pp. 805-819, 2014.

Lakshminarayanan, V., e Sriraam, N., *The Effect of Temperature on the Reliability of Electronic Components*, IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (IEEE CONECCT), 2014.

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

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

Lehnert, M., Vysoudil, M., Kladivo, P., *Semi-stationary measurement as a tool to refine understanding of the soil temperature spatial variability*, International Agrophysics, Vol.29, pp. 449-457, 2015.

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

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

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

Mejdzade, V. A., Babanly, D., Askerova, S. V., e Tagiyev, D., *Phase relations and some properties of the system*, 3rd International Turkic World Conference on Chemical Sciences and Technologies, 2017.

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

Moore, A.L. e Shi, L., *Emerging challenges and materials for thermal management of electronics*, Materials Today (4), vol. 17, pp. 163-174, 2014.

Overduin, P. P., Kane, D. L., e Van Loon. W. K. P., Measuring thermal conductivity in freezing and thawing soil using the soil temperature response to heating, Cold Regions Science and Technology (1), Vol. 45, pp. 8-22, 2006.

Popiel, C., Wojtkowiak, J., e Biernacka, B., Measurements of temperature distribution in ground, Experimental Thermal and Fluid Science (5), Vol. 25, pp. 301-309, 2001.

PT Inovação, Manual Emilo-NG, Plataformas Multiserviço, 2017. Consultado a setembro 5, 2017. Disponível em: <https://fccid.io/ANATEL/00540-09-05232/Folder-EMILO/BFC60BB4-B609-4AD7-9660-EADE0B33915C>

Purcell Systems, *Selecting Outdoor Enclosures for Wireless and Cellular Communications*, White Paper, 2012.

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

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

Samba, A., Louahlia-Gualous, H., Masson, S. L., e Nörterhäuser, D., *Two-phase thermosyphon loop for cooling outdoor telecommunication equipment*. Applied Thermal Engineering (1), Vol. 50, pp.1351-1360, 2013.

Sanner, B., 2.6. *Geothermal heat pumps technologies and development*, International Geothermal Days, Zakopane, Polónia, pp. 100-108, 2004.

Schmidt, R. R., e Shaukatullah. H., *Computer and telecommunications equipment room cooling: a review of literature*, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 26, pp. 89-98, 2003.

Sharan, G., Sahu, R.K, Jadhav, R., *Air-Cooling and Heating System for Tiger in Zoo using Earth Tube Heat Exchanger*, 2002.

Shende, M.D. e Mahalle, A., *Cooling Of Electronic Equipments with Heat Sink: A Review of Literature*, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (2), Vol. 5, pp. 56-61, 2013.

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

Smits, K. M., Sakaki, T., Limsuwat, A., e Illangasekare, T. H., Thermal conductivity of sands under varying moisture and porosity in drainage-wetting cycles. *Vadose Zone Journal* (1), Vol. 9, pp. 172-80, 2010.

Soni, K. S., Pandey, M., e Bartaria, N. V., *Energy metrics of a hybrid earth air heat exchanger system for summer cooling requirements*, *Energy and Building*, Vol. 129, pp.1-8, 2016.

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

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

Tu, R., Liu, X., Li, Z., e Jiang, Y., *Energy performance analysis on telecommunication base station*, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 315-325, 2011.

Usovicza, B., Łukowskia, M. I., Rüdigerb, C., Walkerb, J. P., e Marczewski, W., Thermal properties of soil in the Murrumbidgee River Catchment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, pp. 604-614, 2017.

Walczak, R., e Usowicz, B., Variability of moisture, temperature and thermal properties in bare soil and in crop field, *International Agrophysics*, Vol. 8, pp. 161-169, 1994.

Wang, N., Zhang, J., e Xia, X., *Energy consumption of air conditioners at different temperature set points*, *Energy and Buildings*, Vol. 65, pp. 412-418, 2013.

Wankhede, M., Khaire, V., e Goswami, A., *Evaluation of Cooling Solutions for Outdoor Electronics*, IEEE - 13th International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems (THERMINIC), 2007.

Yu, X., Zhang, N., Pradhan, A., e Puppala, A., Thermal conductivity of sand-kaolin clay mixtures, *Journal of Environmental Geotechnics* (4), Vol.3, pp. 190-202, 2016.

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

Zhang, N., e Wang, Z., Review of soil thermal conductivity and predictive models, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 117, pp. 172-183, 2017.

Zhou, F., Chen, J., Ma, G., e Liu, Z., *Energy-saving analysis of telecommunication base station with thermosyphon heat exchanger*, *Energy and Buildings*, pp. 537-544, 2013.

Zhou, S., Cui, W., Tao, J., Peng, Q., *Study on ground temperature response of multilayer stratums under operation of ground-source heat pump*, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 101, pp.173-182, 2016.

Zukowski, M., e Topolanska, J., *Comparison of thermal performance between tube and plate ground-air heat exchangers*, *Renewable Energy*, Vol. 115, pp. 697-710, 2018.