



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Aplicação de um permutador de calor ar-solo no arrefecimento de um armário de telecomunicações

Daniel Afonso Diogo

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

Orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires
Coorientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva

Departamento de Engenharia Eletromecânica
Universidade da Beira Interior
Covilhã, Portugal

Covilhã, outubro de 2017

Dedicatória

Ao meu pai, por tudo o que sou hoje.

Agradecimentos

A presente dissertação marca o fim de mais uma etapa na minha vida e só foi possível a sua realização com o apoio de diversas pessoas. Assim sendo, apenas posso expressar o meu profundo agradecimento pois sem esta ajuda não seria possível a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, quero agradecer aos dois professores que me orientaram tão bem neste trabalho. Ao meu professor e orientador Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires por toda a confiança depositada em mim e também por toda a paciência e dedicação ao longo, não só da dissertação, mas também do percurso académico.

Ao meu coorientador Professor Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva por todo o conhecimento, ideias e técnicas fornecidas que resultaram na melhor elaboração do trabalho.

Agradeço também ao técnico responsável do Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor da Universidade da Beira Interior, Sr. João Correia por todo o empenho e paciência na aquisição dos materiais assim como toda a disponibilidade prestada.

A todos os meus amigos e colegas de curso por todos os bons momentos e que de uma forma ou outra aligeiraram o percurso académico. Também a todos os docentes da Universidade da Beira Interior, pois o seu contributo de conhecimentos foi fundamental na realização deste projeto.

Ao meu pai, António Diogo e à minha mãe, Elisabete Afonso, um eterno obrigado por todo o esforço, sacrifício que fizeram para me oferecer esta oportunidade. Ao meu irmão, Jorge Diogo, por toda a motivação e paciência nos bons e nos maus momentos. Obrigado!

À minha namorada, Marta Melo, por todo o apoio e motivação dado, por me ter ajudado nos piores momentos e fazer-me provar que com muita força, tudo é possível.

A todos, muito obrigado!

Resumo

O número de clientes subscritos em planos de telecomunicações móveis tem aumentado a um ritmo intenso, obrigando as empresas fornecedoras destes serviços a montarem cada vez mais instalações com armários de telecomunicações, de forma a abranger todas as necessidades dos clientes. Estes armários estão dimensionados para que a temperatura dos equipamentos no seu interior não ultrapasse os 55 °C. Para arrefecer os equipamentos no seu interior são usadas diversas técnicas de arrefecimento, como o a utilização de sistemas convencionais de ar condicionado ou a ventilação forçada. Estes métodos consomem entre 25% a 50% do valor total de energia de cada instalação, contribuindo assim para o elevado consumo energético e, como tal, representando custos muito elevados. Não só custos monetários, mas também um enorme consumo de recursos energéticos do nosso planeta influenciado a libertação de gases de ozono para a atmosfera aumentando o efeito de estufa.

Face ao pressuposto, a presente tese apresenta uma solução de arrefecimento passiva utilizando a inércia térmica do solo. Assim, foi utilizado um permutador de calor ar-solo para arrefecimento do interior de um armário de telecomunicações. Este foi equipado com uma resistência elétrica de forma a simular a dissipação da carga térmica dos equipamentos que fazem parte dos sistemas de telecomunicação e todos os restantes equipamentos periféricos. Posteriormente, foi analisado o desempenho do sistema de arrefecimento através da monitorização da temperatura no interior do permutador de calor e no armário de telecomunicações, tendo sido efetuados diversos ensaios com diferentes condições.

Para além deste trabalho foi também realizado outro trabalho em paralelo, que consistiu em analisar o perfil térmico do solo em três locais distintos na cidade da Covilhã. Este estudo teve como objetivo conhecer a evolução da temperatura do solo nestas localizações e como é que as diferentes propriedades dos solos influenciam a sua condutibilidade térmica.

Palavras-chave

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

Abstract

The number of subscribers to mobile telecommunications plans has increased at a very high rate, obliging service providers to set up more and more telecommunications cabinets to cover all customer needs. These cabinets are sized so that the temperature of the equipment inside does not exceed 55 °C. To cool down the equipment inside, various cooling techniques are used, such as the use of conventional air conditioning systems or forced air ventilation from outside. These methods consume between 25% and 50% of the total energy value of each installation, contributing to the high energy consumption and thus representing very high costs. Not only monetary costs but also a huge consumption of our planet's energy resources influenced the release of ozone gases into the atmosphere by increasing the greenhouse effect.

The present thesis presents a passive cooling solution using the thermal inertia of the soil. Work was carried out with an air-ground heat exchanger that was used for cooling the interior of a telecommunications cabinet. The cabinet was equipped with an electrical resistance to simulate the dissipation of the thermal load of the equipments that are part of the telecommunication system and all the peripherals equipments as well. Afterwards, the performance of the cooling system was analyzed through the temperature monitoring inside the heat exchanger and in the telecommunications cabinet. Several tests were carried out with several conditions.

In addition to this work, another work was also carried out in parallel, which consisted of monitoring the soil thermal profile temperature in three separate locations in the city of Covilhã. This study aimed to know the evolution of soil temperature in these locations and how the different soil properties influence its thermal conductivity.

Keywords

Cooling of a telecommunications cabinet, Air-to-ground heat exchanger, Passive cooling, soil temperature monitoring.

Índice

Dedicatória.....	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Palavras-chave	vii
Abstract- alterar	ix
Keywords	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Acrónimos.....	xix
1 - Introdução	1
1.1 - Perspetiva geral	1
1.2 - O problema em estudo e a sua relevância.....	2
1.3 - Estado da arte	4
1.3.1 - Aplicação de permutadores de calor ar-solo nos armários de telecomunicações...4	
1.3.2 - Técnicas de arrefecimento e impacto da temperatura no funcionamento dos equipamentos	6
1.3.3 - Aplicação de permutadores ar-solo para arrefecimento	10
2 - Armário de telecomunicações	15
2.1 - Introdução	15
2.2 - Evolução das tecnologias de telecomunicações moveis	16
2.3 - Influência da temperatura nos equipamentos eletrónicos.....	18
2.4 - Técnicas de arrefecimento de armários de telecomunicações	24
2.5 - Armário em estudo.....	32
2.5.1 - Características do armário.....	33
2.5.2 - Equipamentos no interior do armário de telecomunicações.....	36
3 - Permutador ar-solo	39
3.1 - Introdução	39
3.2 - Geometrias de permutadores de calor ar-solo.....	42
3.3 - Parâmetros influentes no desempenho do permutador ar-solo	46
3.3.1 - Parâmetros associados ao permutador	46
4 - Instalação experimental	57
4.1 - Introdução	57
4.1.1 - Melhorias efetuadas.....	57
4.2 - Permutador de calor ar-solo	60
4.3 - Armário de telecomunicações	60
4.4 - Equipamentos auxiliares	61

4.4.1 - Sistemas de monitorização	62
4.4.2 - Sistemas de ventilação	64
4.4.3 - Sistemas de alimentação	66
4.4.4 - Sistemas de aquecimento	68
5 - Estudo experimental	69
5.1 - Monitorização da temperatura do solo	69
5.2 - Ensaios com o permutador ar-solo e o armário	71
5.2.1 - Ensaio com ventilação forçada de ar exterior usando apenas os ventiladores do armário	75
5.2.2 - Ensaio com ventilação forçada de ar exterior e ar proveniente do permutador ar-solo	76
5.2.3 - Ensaio com ventilação forçada de ar exterior usando os ventiladores do armário e um ventilador auxiliar	77
5.3 - Discussão de resultados	78
5.3.1 - Monitorização da temperatura	78
5.3.1.1 - Local 1 - Engenharias	78
5.3.1.2 - Local 2 - Reitoria_Baixo	81
5.3.1.3 - Local 3 - Reitoria_Cima	83
5.2.1.4 - Análise granulométrica	85
5.3.1.5 - Comparação dos três locais	86
5.3.2 - Aplicação do permutador ar-solo no armário de telecomunicações	87
6 - Conclusão	95
6.1 - Recapitulação	95
6.2 - Sugestão para trabalho futuro	97
Referências bibliográficas	99

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Distribuição em percentagem da energia consumida por uma estação base de telecomunicação. Adaptado de Duarte <i>et al.</i> , (2015).	3
Figura 2.1 - Trafego móvel em todo o mundo compreendido entre 2011/2016. Ericsson, (2016).	18
Figura 2.2 - Principais fatores que levam a diminuição da vida útil dos equipamentos. Adaptado de Zang <i>et al.</i> , (1997).	19
Figura 2.3 - Representação das diversas formas de aquecimento. Hahighi, (2016).	20
Figura 2.4 - Transferência de calor por condução. Oliveira, (2014).	41
Figura 2.5 - Transferência de calor por convecção. Oliveira, (2014).	22
Figura 2.6 - Transferência de calor por radiação. Oliveira, (2014).	23
Figura 2.7 - Infiltração de calor através das entradas de ar.	24
Figura 2.8 - Demonstração do sistema de armário duplo. Hahighi, (2016).	25
Figura 2.9 - Exemplo do esquema de recirculação. Mariam <i>et al.</i> , (2009).	25
Figura 2.10 - Armário com sistema de ar condicionado. VIKINOR, (2017).	26
Figura 2.11 - Esquema do sistema de ar condicionado com economizador. Mariam <i>et al.</i> , (2009).	26
Figura 2.12 - Representação do sistema de ar forçado. ESTEL, (2017).	27
Figura 2.13 - Diferentes tipos de acabamentos. Wankhede, (2007).	28
Figura 2.14 - Unidade de radiotransmissão com permutador ar-agua. Nörtershäuser <i>et al.</i> , (2014).	28
Figura 2.15 - Funcionamento de um material de mudança de fase, DAIKIN.	29
Figura 2.16 - Esquema de montagem de um sistema de arrefecimento por termossifão no armário. Adaptado de Samba <i>et al.</i> , (2012)	30
Figura 2.17 - Permutador ar-solo. Yuping <i>et al.</i> , (2008).	31
Figura 2.18 - Permutador com recurso a água, Yuping <i>et al.</i> , (2009).	32
Figura 2.19 - Armário ABE_V2 com os equipamentos mencionados. Delgado (2016)	33
Figura 2.20 - Vista exterior do armário ABE_V2.	34
Figura 2.21 - Exemplificação da unidade Rack, 42U	35

Figura 2.22 - Huawei BTS3900. Huawei, (2016).	36
Figura 3.1 - Representação de um permutador vertical no solo. Adaptado de Hernandez <i>et al.</i> , (2007).	39
Figura 3.2 - Esquema de funcionamento de um permutador. Adaptado de Enciclopédia britânica (2012).	40
Figura 3.3 - Permutador agua-solo. Adaptado de geothermalgenius.com.	42
Figura 3.4 - Tipos de sistemas em circuito aberto e em circuito fechado. Manjul <i>et al.</i> , (2016).	43
Figura 3.5 - a) serie, b) paralelo, c) trincheira, d) trincheira por patamares. Adaptado de geothermie.de.	44
Figura 3.6 - Permutador vertical. Adaptado de geothermie.de.	45
Figura 3.7 - Representação do corte de secção dos tubos no sistema vertical.	46
Figura 3.8 - Variação da temperatura a saída com diferentes profundidades. Adaptado de Ghosal, (2006).	47
Figura 3.9 - Variação da temperatura a saída com diferentes comprimentos. Adaptado de Ghosal, (2006).	48
Figura 3.10 - Variação da temperatura com diferentes velocidades de ar. Adaptado de Ghosal, (2006).	49
Figura 3.11 - Desempenho do permutador com diferentes materiais. Adaptado de Gan, (2017).	50
Figura 3.12 - Camadas do solo e descrição das mesmas. Universidade do Minho.	51
Figura 3.13 - Composição da camada superficial do solo. Adaptado de Freire, (2008).	52
Figura 3.14 - Gráfico da condutibilidade térmica de alguns minerais. Neylor e Gustin.	53
Figura 3.15 - Comparação das temperaturas num solo descoberto e coberto com vegetação. Adaptado de Adaptado de Adaptado de Cook, (1989).	53
Figura 3.16 - Peneiras usadas para separar o material retirado dos furos. Calado, (2016).	54
Figura 3.17 - Carta dos solos portuguesa. INEG, (2017).	55
Figura 4.1 - Fotografias da intervenção realizada junto a uma sonda de monitorização da temperatura. À esquerda: antes da intervenção. À direita: depois da intervenção.	58
Figura 4.2 - Melhoria efetuada no local onde se encontra o permutador.	58
Figura 4.3 - Furos efetuados no painel inferior do armário de telecomunicações.	59

Figura 4.4 - Representação das passagens de ar necessárias para os ensaios.	59
Figura 4.5 - Vista exterior do armário em estudo.	61
Figura 4.6 - Datalogger PCE-T 1200 (PCE instruments).	62
Figura 4.7 - Anemômetro de hélice Testo 416.	63
Figura 4.8 - Medidor de potência.	64
Figura 4.9 - Ventiladores da marca Testo presentes no interior do armário.	65
Figura 4.10 - Ventiladores presentes na caixa onde se encontra a resistência elétrica.	65
Figura 4.11 - Ventiladores auxiliares da marca S&P.	66
Figura 4.12 - Fonte de alimentação AC variável presente no laboratório.	67
Figura 4.13 - Fonte de alimentação DC de valor fixo.	67
Figura 4.14 - Adaptador AC/DC 48V para os ventiladores do armário.	68
Figura 4.15 - Resistência elétrica de 50 Ω	68
Figura 5.1 - Localização do ponto de leitura 1 no polo das engenharias da UBI.	70
Figura 5.2 - Localização dos pontos de leitura 2 e 3 na reitoria da UBI.	70
Figura 5.3 - Localização dos diversos componentes de apoio ao ensaio.	72
Figura 5.4 - Localização dos 6 termopares presentes no armário.	73
Figura 5.5 - Localização dos termopares ao longo do permutador. Calado, (2016).	74
Figura 5.6 - Esquema da ventilação do armário com os ventiladores embutidos.	76
Figura 5.7 - Esquema de montagem do ensaio com o permutador de calor ar-solo.	77
Figura 5.8 - Valores da temperatura medidas ao longo da profundidade no local 1.	79
Figura 5.9 - Gráfico referente as leituras efetuadas ao longo do ano para as diferentes profundidades no local 1.	80
Figura 5.10 - Valores da temperatura medidas ao longo da profundidade no local 2.	81
Figura 5.11 - Gráfico referente as leituras efetuadas ao longo do ano para as diferentes profundidades no local 2.	82
Figura 5.12 - Valores da temperatura medidas ao longo da profundidade no local 3.	83
Figura 5.13 - Gráfico referente as leituras efetuadas ao longo do ano para as diferentes profundidades no local 3.	84

Figura 5.14 - Curvas granulométricas representativas das quatro amostras. Adaptado de Calado, (2016).	85
Figura 5.15 - Temperatura média no verão para os 3 locais nas diversas profundidades.	86
Figura 5.16 - Temperatura média no inverno para os 3 locais nas diversas profundidades.	87
Figura 5.17 - Temperaturas obtidas ao longo do dia com a utilização de apenas dos ventiladores do armário.	88
Figura 5.18 - Temperaturas obtidas ao longo do dia com a utilização do permutador de calor e respetivos ventiladores.	89
Figura 5.19 - Temperaturas obtidas ao longo do dia com a utilização do ventilador externo e ventiladores do armário.	90
Figura 5.20 - Comparação da temperatura do termopar 2 nos 3 ensaios.	91
Figura 5.21 - Comparação das potencias de arrefecimento para os 3 tipos de ensaios.	92
Figura 5.22 - Comparação da temperatura no interior do armário com a temperatura ambiente ao longo do dia no ensaio do dia 15 de agosto.	93
Figura 5.23 - Comparação da temperatura a saída do permutador com a de entrada no armário.	94

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Comparação das características de cada tecnologia de telecomunicação.	17
Tabela 2.2 - Condutibilidade térmica de alguns materiais.	21
Tabela 2.3 - Coeficiente convectivo.	22
Tabela 4.1 - Características técnicas do <i>datalogger</i> PCE-T 1200.	62
Tabela 4.2 - Características técnicas do anemómetro. Testo 416.	63
Tabela 4.3 - Características técnicas do medidor de potência. Avidsen.	64

Lista de Acrónimos

A	Ampere
AC/AC	Corrente alternada / corrente alternada
AC/DC	Corrente alternada/corrente continua
BTS	<i>Base transceiver station</i>
CFD	<i>Computacional fluid dynamics</i>
COP	<i>Coefficient of performance</i>
DFC	<i>Dynamic fluid control</i>
EAHE	<i>Earth-air Heat Exchanger</i>
ELHE	<i>Earth-Liquid Heat Exchanger</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
HP	<i>Horse power</i>
MWh/ano	Megawatts hora ano
PCB	<i>Printed circuit Board</i>
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>
rpm	Rotações por minuto
SMS	<i>Short Message System</i>
V	Volt
VDC	Volt DC
W	Watt

1 - Introdução

1.1 - Perspetiva geral

O elevado número de pessoas conectadas tecnologicamente aumentou de forma significativa nos últimos anos, resultando deste facto um aumento tanto do número, como também da qualidade das infraestruturas que alojam os equipamentos de telecomunicação. Estas infraestruturas são constituídas essencialmente por antenas, sistemas de alimentação e armários de telecomunicações onde se alojam os equipamentos de radio transmissão. Para que um serviço de telecomunicação esteja a operar eficazmente, é necessário que os dispositivos no interior destes armários estejam em perfeitas condições de operação, devendo para tal operar dentro de uma gama de valores aceitáveis indicados pelos fabricantes.

Com o aumento do número dos clientes interligados e com a conseqüente criação de cada vez mais instalações, surge a problemática do consumo energético para o seu arrefecimento, que tem de ser suportado pelas operadoras. As técnicas de arrefecimento usadas atualmente levantam sérias questões face ao seu consumo, em que 25% a 50% da energia elétrica consumida pela instalação serve apenas para o seu arrefecimento, Haghghi *et al.*, (2016). De forma a colmatar estes custos, denota-se o crescente interesse das operadoras em desenvolver uma nova técnica que permita arrefecer de forma mais eficiente os armários. Esta tem como objetivo não só a poupança de custos económicos, mas também diminuir o impacto ambiental (pela conseqüente redução no consumo de recursos energéticos). Uma das soluções passará pela utilização de um permutador de calor ar-solo, em que se utiliza a energia térmica do subsolo como método de arrefecimento dos armários de telecomunicações. Esta técnica consiste em forçar o ar ambiente em redor do armário (à temperatura ambiente), para o subsolo através de um sistema de tubagem e direcioná-lo para o interior do mesmo com uma temperatura regulável conforme a necessidade de climatização.

No que concerne á estrutura desta dissertação, esta encontra-se dividida em 2 partes que se complementam entre si, num total de 5 capítulos, que refletem a vertente teórica e a prática conjugadas. No primeiro capítulo será efetuada uma abordagem onde serão expostas as causas e efeitos devido à temperatura nos equipamentos eletrónicos num armário de telecomunicações. Após essa investigação será apresentado no capítulo 2 diversas soluções de arrefecimento onde se evidenciarão todas as características e morfologias das mesmas. O capítulo 3 serve para expor o potencia de arrefecimento do solo. O capítulo 4 serve para demonstrar o processo prático da aplicação da solução com recurso ao permutador de calor ar-solo. Os resultados obtidos são discutidos e analisados no capítulo 5. Para suportar o trabalho foi feita uma pesquisa na comunidade científica em redor destes temas. A presente dissertação realça os diversos desafios deparados pelas mais diversas pesquisas na área. Serão apresentadas investigações e qual o seu contributo para a resolução dos problemas enfrentados. Será também

exposta uma realização prática de modo a testar e provar a ideia na qual esta dissertação assenta.

1.2 - O problema em estudo e a sua relevância

O mundo atual conforme o conhecemos está em constante mudança e a forma como as pessoas se comunicam não é exceção. O crescimento repentino das telecomunicações deve-se ao facto da constante necessidade de comunicação, quer seja entre pessoas, quer entre máquinas. Dados estatísticos indicam, segundo a empresa Ericson, um aumento de tráfego de dados na ordem dos 60% por ano, devido ao aumento de subscrições de clientes e também pelo aumento de volume de dados Haghghi, (2016). Mais se refere que no ano de 2035 existam cerca de 8,7 mil milhões de pessoas no mundo e, como tal, a tendência para um aumento das comunicações e consequentemente das infraestruturas irá verificar-se. De forma a existir uma boa base para a comunicação eletrónica à distância, é necessário que o equipamento destinado à sua função esteja nas melhores condições possíveis. As estações base de telecomunicações encontram-se espalhadas em todo o lado de modo a garantir a melhor cobertura das operadoras aos seus clientes, podendo até estar colocadas em zonas onde o clima é bastante agressivo para os equipamentos. Estas estações são a ligação fulcral entre a rede interna das operadoras e os seus clientes ou dispositivos móveis, Lubritto, *et al.* (2011). Deste modo, desenvolver o futuro da economia passa pela modernização dos sistemas de comunicação.

Segundo Tu *et al.* (2011), as estações base consomem cerca de 1/3 de toda a energia eléctrica da infraestrutura de uma operadora. A tecnologia melhorou exponencialmente nos últimos anos permitindo assim criar equipamentos mais eficazes e compactos que podem ser utilizados em espaços cada vez menores, o que provoca a concentração de elevadas temperaturas (Moore e Shi, 2014). Deste modo é possível inserir todos os equipamentos dentro de um armário de pequenas dimensões. Lakshminarayanan e Sriraam, (2014); Wankhede, (2007); Lubritto *et al.*, (2008).

Uma estação base de telecomunicações é normalmente constituída por vários equipamentos de radiocomunicação e por todos os periféricos envolventes nomeadamente o seu sistema de arrefecimento. Sempre que um equipamento eletrónico é sujeito durante o seu período de vida a elevadas temperaturas, a sua eficácia vai baixando ao ponto de ser necessária a sua substituição, acarretando assim mais custos para as empresas, Wankhede, (2007). Para garantir a temperatura ideal é necessário recorrer a um sistema de controlo e climatização. O problema é que os sistemas convencionais consomem aproximadamente 25% a 50% da energia eléctrica total consumida por toda a estação, o que representa um consumo global demasiado alto. São normalmente constituídos por sistemas de ar condicionado que requerem manutenção programada e um investimento elevado. Estima-se que o consumo energético seja perto do 1% do consumo de energia em todo o globo, Roy, (2008).

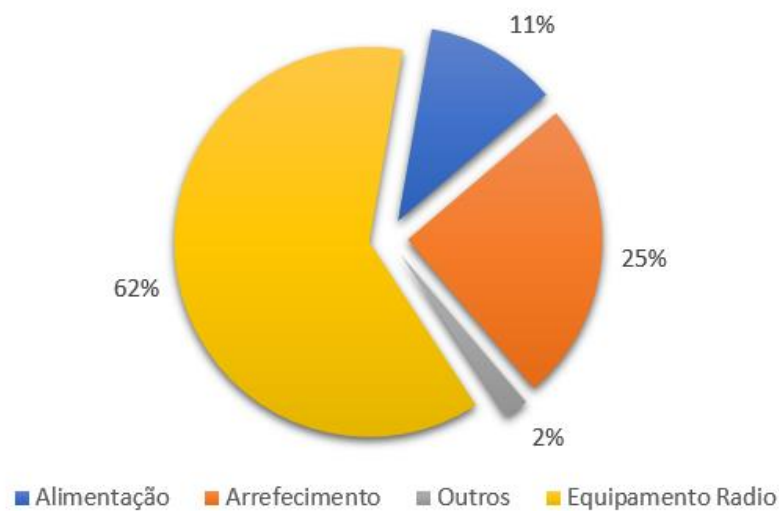


Figura 1.1 - Distribuição da energia consumida por uma estação base. Adaptado de Duarte *et al.*, (2015)

Já existem outras soluções de arrefecimento, que serão apresentadas nos próximos capítulos e que podem substituir os sistemas tradicionais de climatização dependendo essencialmente da temperatura ambiente média. No caso da convecção natural passiva é apenas recomendada a zonas não muito quentes. Existem ainda outras soluções mais elaboradas como a utilização de termofissões e materiais com mudança de fase. Estes sistemas são mais económicos tanto na sua aquisição como na manutenção, face aos sistemas de ar condicionado convencionais. Wankhede, (2007).

Como contribuição para o desenvolvimento de um sistema de arrefecimento eficaz e desse modo auxiliar um futuro sustentável, em termos económicos e ambientais, a presente dissertação expõe um sistema de arrefecimento simples, barato e eficaz. Benhammou e Draoui, (2015). Este sistema é caracterizado pela aplicação de um permutador de calor ar-solo como mecanismo de arrefecimento dos armários das estações base de telecomunicações. A temperatura do subsolo, a uma profundidade aproximada de 3 m, é quase sempre constante ao longo do ano, dependendo do tipo de solo, Jakhar *et al.*, (2015).

1.3 - Estado da arte

Na secção que se segue é apresentado o estado de arte onde se procura reunir e analisar as informações publicadas relativamente ao tema no qual é baseado este trabalho até à data de sua conclusão.

Assim sendo, o estado da arte encontra-se dividido em três subsecções em que na primeira se expõem os estudos feitos com a aplicação de um permutador de calor ar-solo com o intuito de arrefecimento em armários de telecomunicações. A segunda parte apresenta os estudos efetuados, até à data, onde se descreve o impacto da temperatura nos armários de telecomunicações, assim como as suas consequências. Na última subsecção são exibidas investigações relativas à utilização dos permutadores de calor ar-solo para arrefecimento, seja de residências ou grandes edifícios.

1.3.1 - Aplicação de permutadores de calor ar-solo nos armários de telecomunicações

Diversos autores referem que metade do consumo energético dos armários de telecomunicações são devido ao sistema de arrefecimento, seja ele através de sistemas convencionais de ar-condicionado, seja através dos métodos de ventilação forçada. Ainda não existem muitos estudos relativos à aplicação de um permutador ar-solo como sistema de arrefecimento de um armário de telecomunicações. Esta situação verifica-se muito devido ao facto de as empresas e investigadores apenas terem observado, relativamente há pouco tempo, que o solo pode ser uma fonte térmica utilizada como sistema de arrefecimento dos armários de telecomunicações. Os estudos realizados neste sentido são apresentados neste subcapítulo.

Yuping *et al.* (2008) procuraram obter uma solução para dissipar o calor gerado no interior de um armário de telecomunicações. Os investigadores recorreram ao uso de um permutador vertical, enterrado no solo com tubos (alumínio-amónia) em seu redor na horizontal, para arrefecer o armário de telecomunicações. Este armário tem um sistema de ventilação independente e integrado que assegura que o calor gerado no armário seja transferido para o solo e atmosfera sob a forma de convecção. No decorrer da investigação foram efetuados testes em situações reais onde o armário estava exposto à radiação solar durante 3 meses. Durante esse tempo foram recolhidos dados relativos a valores de temperatura, parâmetros de operação e cargas de trabalho dos equipamentos, de 40 pontos de leitura distintos.

Desta investigação concluiu-se que um armário com equipamento que dissipe uma carga térmica de 700 W, o seu COP seria de 110 para condições de temperatura exterior de 30 °C. Este valor provou ser muito mais alto que o COP sem permutador, que rondava entre os 10 a

15. Outra das conclusões de Yuping *et al.* (2008) foi que o funcionamento do sistema era mais silencioso visto que o ar era forçado para debaixo de terra. A nível económico, na perspetiva dos autores, esta implementação trouxe impactos bastante positivos na manutenção dos equipamentos, visto que já não aqueciam tanto e havia menor necessidade de os trocar, também devido ao facto de consumirem menos energia do que os sistemas convencionais de ar-condicionado, retorna um impacto positivo ao ambiente.

Ainda no seguimento do primeiro estudo apresentado anteriormente, Claudio Bianco *et al.* (2008), apresentaram um estudo que surgiu da junção da ideia de duas empresas, Telecom Itália e Huawei. Este estudo decorreu em 2008 onde um armário de telecomunicações foi instalado por cima de uma estrutura onde existem de tubos de alumínio enterrados, com uma concentração de amónia sobre pressão. O sistema é constituído por uma bomba de água preparada para o efeito. A grande diferença em relação ao estudo anterior foi que o fluido condutor não era ar, mas sim a concentração de amónia. O ar é forçado através de um único ventilador que retira o ar fresco do interior da estrutura onde estão os tubos e o direciona para o armário onde se encontram os equipamentos de telecomunicação. Assim sendo, o ar aquece e, por convecção natural, sobe até ao local de recolha do ar quente onde é forçado novamente para a estrutura debaixo de terra por sucção. Fizeram também uma simulação numérica para verificar e otimizar os resultados. Nesta investigação foram obtidos valores de COP superiores a 100.

O teste realizado por Hiroaki Ohbayashi *et al.* (2007) é, na sua génese, idêntico ao proposto nesta dissertação, contudo, em vez de ser usado ar com condutor de calor, é usada a água. No decorrer da investigação foram desenvolvidos dois testes. Uma simulação numérica para se perceber o tamanho do permutador a usar, inserindo os dados relativos ao tamanho do armário e potências dissipadas dentro do mesmo. Para o teste experimental foram usados três armários semelhantes, apresentando, no entanto, algumas diferenças. Um dos armários foi alterado de maneira a ter um permutador de calor onde circula-se a água e se arrefece o seu interior. Um outro alterado apenas com uma fonte de calor, com o objetivo de perceber qual a temperatura máxima que se iria atingir. O terceiro armário possui equipamento de medição de modo a ter leituras dos termopares instalados nos outros dois armários. Para controlar a temperatura, durante o verão, foi usado um simples controlador em que, quando a temperatura interior do armário fosse superior a 35 °C, o sistema de bombeamento de água entrava em funcionamento desligando-se quando a temperatura fosse inferior a 30 °C. O sistema opera de forma similar durante o inverno, quando as temperaturas no interior fossem inferiores a 3 °C a bomba ligava e acima dos 6 °C desligava de modo a aquecer o interior do armário. Na conclusão deste estudo, obtiveram um COP de 12,5 com o permutador em comparação com o sistema de ar-condicionado de 3,5.

Yuening Li *et al.* (2009) apresentaram, de uma certa forma, um estudo idêntico ao anterior, pois também foi usada água como fluido de arrefecimento. Os autores deste estudo salientaram que o uso de água é mais eficaz do que o convencional estudado até então, o ar. Este foi

realizado na China onde as temperaturas máximas não ultrapassaram os 35 °C. O sistema engloba um permutador ar-água, uma bomba de água e os tubos, sendo estes o permutador água-solo. Todo este sistema ficou bastante mais barato que o convencional ar-condicionado tanto no valor inicial de compra, como no que toca a manutenções.

A instalação do sistema de arrefecimento debaixo de terra foi feita no momento da montagem do armário, melhorando assim os custos inerentes à sua montagem. Com um tubo de 20 m de comprimento e diâmetro exterior de 20 mm foi possível baixar a temperatura em mais de 10 °C dentro do armário mantendo assim a temperatura dos equipamentos dentro dos limites de funcionamento.

Gianluca Griffa *et al.* (2008) optaram por duas pesquisas diferentes. Uma delas foi o melhoramento do fluxo de ar melhorando o *layout* do armário e o outro foi através de simulações CFD “*Computational Fluid Dynamics*” aplicar um permutador ar-solo. Este permutador ar-solo não é um típico permutador, mas sim uma estrutura já existente de acesso a túneis subterrâneos onde os diversos técnicos de serviços camarários e de telecomunicações têm acesso. A sua aplicação foi utilizada apenas para arrefecimento, pois já vimos anteriormente que pode também ser usado como fonte térmica de calor para aquecimento do armário. Os investigadores realizaram uma simulação que permitiu analisar com mais detalhe a distância do armário ao túnel e qual o diâmetro dos tubos de modo a obter o fluxo de ar ideal. Para este estudo foi replicado o armário e todas as variáveis desde a temperatura do solo, a radiação solar e a condutibilidade térmica dos diferentes materiais. A implementação deste armário foi cuidadosamente escolhida para uma localização próxima destes túneis de modo a facilitar a sua implementação. A conclusão dos autores foi que é possível reduzir em 70% o consumo de energia face aos tradicionais métodos de arrefecimento e ainda uma diminuição do ruído, uma vez que a ventilação forçada era proveniente de dois ventiladores ao nível do solo.

1.3.2 - Técnicas de arrefecimento e impacto da temperatura no funcionamento dos equipamentos

Neste subcapítulo serão abordados alguns dos trabalhos feitos por diversos autores onde se mostram os diversos tipos de arrefecimento atualmente disponíveis, ou em fase de testes até à data. Será também evidenciado o efeito da temperatura nos equipamentos de telecomunicações. De modo a manter o seu funcionamento e a fiabilidade dos mesmos, é necessário que o equipamento funcione dentro de uma gama de temperaturas aceitáveis. Os equipamentos, para além de mais compactos, são mais rápidos no que respeita ao processamento e, perante este aumento da velocidade de computação, surge o calor gerado pelos seus circuitos e respetivos componentes, Lakshminarayanan e Sriraam, (2014).

Ehsan (2016) desenvolveu um modelo analítico simplificado onde o arrefecimento é dividido pelo ar-condicionado e sistema de convecção natural. O investigador testou o desempenho para armários simples e duplos onde se distribuem os equipamentos pelos dois armários, diminuindo assim a carga térmica de cada um. Desta forma separou as baterias para um armário e o equipamento para o outro. O modelo serviu para calcular as temperaturas em diversas divisões. O estudo foi realizado em diversas zonas do globo nomeadamente em Copenhaga, San Francisco, Shanghai e no Dubai. A conclusão deste estudo é de que um sistema duplo acompanhado com um sistema de permutador melhorava substancialmente o desempenho no arrefecimento da instalação.

Outro tipo de arrefecimento muito usual é a ventilação através de ar forçado. Yi Chen, Yufeng Zhang e Qinglin Meng (2010) concluíram que, através do melhoramento do sistema de ventilação forçada, poder-se-ia obter um melhor desempenho no arrefecimento e como tal uma diminuição no consumo energético. Neste estudo aplicaram um caso prático em Guangzhou, na China e determinaram uma poupança de custos energéticos de 49% face ao tradicional ar-condicionado, não comprometendo a viabilidade do sistema. O sistema de ar-condicionado manteve-se operacional, mas usado em modo complementar, quando o sistema de ventilação forçada não conseguisse atingir o valor necessário dentro do armário.

Outro estudo relacionado com o ar forçado no interior do armário foi levado a cabo por Mariame *et al.* (2009) onde se simulou o arrefecimento de um armário exterior de modelo RBA84-3036. O estudo recaiu em alterar a posição dos ventiladores que arrefecem o banco de baterias presentes no interior do armário. Para simular estas condições, foi usado o *software* de CFD denominado de FLOTHERM. Para além da reposição dos ventiladores foi também alterado o número dos mesmos. Esta pesquisa concluiu que aumentando o caudal dos ventiladores e posicionando-os mais próximos das baterias permitia reduzir de forma substancial a temperatura do armário.

Mark Hendrix e Lindsay Allen (2010) focaram-se em reduzir o tempo ativo de ar-condicionado ou mesmo eliminá-lo, usando outros métodos de arrefecimento para compensar. Para tal recorreram a ferramenta computacional CFD para simular três tipos de arrefecimento. Os investigadores determinaram que o sistema convencional de ar-condicionado era apto para qualquer região do planeta terra, contudo a sua utilização como economizador era mais favorável para regiões mais quentes, onde se usa ar forçado exterior juntamente com o sistema de ar-condicionado para arrefecer. O método de ar forçado era mais favorável em zonas mais frescas, longe do equador. Esta investigação concluiu também que em certos testes a diferença entre ter o armário a +35 °C ou a +33 °C o consumo energético era mais de o dobro.

Os investigadores Che *et al.* (2012) decidiram melhorar o sistema convencional de ar-condicionado presente num armário de telecomunicações na cidade de Guangzhou, China. O seu foco principal foi desenvolver um sistema de controlo que acionava ventiladores, forçando o ar exterior a entrar no armário e assim, sempre que a temperatura passasse um valor limite

estipulado inicialmente, o sistema de ar condicionado entrava em funcionamento. Desta forma foi possível obter uma poupança energética perto dos 49% e com um retorno em menos de dois anos.

Os autores V.Lakshminarayanan e N.Sriraam (2014) referem que o *stress* térmico é a maior causa de falha dos equipamentos eletrónicos. Os mesmos autores referem ainda vários modelos de análise de falhas dos equipamentos nas quais se salientam a corrosão, electro migração, contaminação, oxidação e defeitos de montagem. Qualquer uma destas falhas é um fator que irá influenciar a fiabilidade do equipamento com o aumento da temperatura.

Nörtershäuser *et al.* (2014) realizaram uma pesquisa onde o fluido refrigerante do sistema é a água. Os investigadores escolheram fazer este teste porque a água apresenta um nível de refrigeração mais eficaz face ao sistema de ar. O armário escolhido foi de grandes dimensões (600x600x2055 mm³), normalmente usado por servidores. Para simular a carga térmica máxima foram utilizadas dez resistências de modo a obter 2000 W de potência térmica dissipada. Os ensaios realizados contemplam dois modos distintos. Um deles consistiu em arrefecer o armário por inteiro, onde se usaram placas ocas nas laterais do armário onde a água flui em serpentina. Essa água é depois transportada para um permutador água-ar que se encontra no topo do armário. Esta solução não se demonstrou muito eficaz pois todo o sistema de arrefecimento consumia 689 W de potência para manter a temperatura abaixo do nível crítico.

A outra solução avançada pelos autores foi a colocação de placas encostadas diretamente às PCB's dos equipamentos eletrónicos. Estas placas de alumínio, ligadas entre si, possuem canais onde passa o líquido refrigerante, neste caso a água, e devido à sua proximidade com os elementos emissores de energia térmica, consegue absorver mais eficazmente o calor por gerado. Os autores deste estudo concluíram que a energia consumida por este sistema era muito inferior ao outro com uma aplicação mais barata.

Já Wankhede *et al.* (2007) fazem referência a vários tipos de técnicas de arrefecimento desde o tipo de tinta e cor a usar no exterior do armário, a utilização de parede dupla e ao acondicionamento da posição dos ventiladores. Para o teste usaram um armário 30x30x40 cm³ onde se colocaram oito placas com uma potência térmica dissipada de 12,5 W perfazendo um total de 100 W. Antes de comprovar os resultados efetuaram uma análise em CFD com o *software* ICEPAK onde simularam doze condições diferentes onde variavam todos os parâmetros. Após a simulação optaram por escolher três configurações diferentes para testes práticos posteriores. O resultado prático obtido foi um armário sem qualquer pintura, expondo a parede em alumínio, um armário pintado de preto e um outro de branco.

Cada um destes armários sofreu alterações no que diz respeito à ventilação: fechado, com grelhas, com ventilação e com escudo solar tendo sido estudados no total doze configurações. A conclusão foi que o armário pintado de branco, com ventilação e com escudo solar foi a que apresentou a temperatura mais baixa enquanto o armário sem qualquer pintura e fechado é o

que mais aquece. Outra conclusão importante deste estudo foi que o armário pintado de preto com ventilação forçada tinha um desempenho inferior que o armário branco nas mesmas condições. Os investigadores determinaram que a temperatura no interior do armário pode subir até 20% apenas devido à exposição solar. A ventilação forçada baixa a temperatura interior até 55% em relação a um sistema sem ventilação.

Em 2009 Muralidharan *et al.*, deram início a um estudo baseado na influência da parede dupla nos armários de telecomunicações. Em vez de alterar o tipo de revestimento como no caso anterior, decidiram analisar quatro configurações distintas na estrutura interna das paredes do respetivo armário. Desta forma, surgiu a configuração sem parede dupla, parede dupla apenas nas laterais, parede dupla em todas as paredes e teto, e por fim uma configuração igual à anterior, mas com ventilação interna entre as paredes. Estas configurações foram analisadas através do *software* FLOTHERM, tendo os resultados obtidos demonstrado que a configuração que dissipa mais eficazmente a carga térmica no interior do armário é a última. Outra conclusão obtida foi de que a espessura tem muito pouca ou nenhuma influência no desempenho térmico do armário.

Outras técnicas de arrefecimento foram apresentadas por diversos autores, nomeadamente por Samba *et al.* (2013). Este estudo recorreu ao sistema de termossifão para o arrefecimento do interior dos armários de telecomunicação. Estes processos combinados com a miniaturização dos diâmetros dos canais hidráulicos apresentaram grandes melhoramentos no processo de transferência de calor. Para o estudo recorreu-se a um armário *standard* da operadora de telecomunicações francesa France Telecom. Os investigadores aplicaram valores desde a potência mínima à potência máxima a resistências dentro do armário de forma a simular equipamentos de telecomunicação. O estudo permitiu concluir que o sistema de arrefecimento através de termossifão permitia obter, aproximadamente, 2,5 vezes melhores resultados que o sistema convencional de ventilação forçada.

Os materiais de mudança de fase também foram alvo de estudo por parte de outros autores. Sun *et al.* (2015) realizaram um estudo onde simularam a utilização de um armário com arrefecimento através de materiais de mudança de fase. Este tipo de arrefecimento requer algum espaço adicional face aos sistemas de ventilação convencionais. Neste estudo, o sistema de ar-condicionado foi programado para funcionar quando as temperaturas no interior do armário fossem acima do estipulado. Este método permitiu uma poupança de 50% aproximadamente a nível de consumo energético. Os investigadores determinaram também que este tipo de arrefecimento funciona melhor em climas amenos situados a uma distância média do equador e dos polos.

1.3.3 - Aplicação de permutadores ar-solo para arrefecimento

A utilização do solo como fonte térmica pode ter diversas naturezas. Estas diferenciam-se pelo facto de serem diretas ou indiretas, podendo também ser usadas com outros sistemas, denominando-se assim de sistemas híbridos. Por aplicações diretas, entende-se em ter o espaço a climatizar em contacto direto com o solo, através de uma ou mais paredes de um edifício parcialmente enterrado. Já o contacto indireto refere-se à utilização de permutadores ar-solo, o qual retrata o tema da presente dissertação.

De forma a compreender a importância da condutibilidade térmica do solo em redor de um permutador Vikas *et al.* (2012) estudaram as características do solo em redor do mesmo e analisaram o seu desempenho ao longo de várias horas. Optaram por desenvolver um método matemático em CFD com a ajuda do *software* Fluent 6.3, definindo os parâmetros relativos a: condutibilidade de três tipos de solo, a velocidade do ar em 5 m/s e um tubo de PVC com um diâmetro de 0,2 m com cerca de 60 m de comprimento. Deste modo foi possível comparar o desempenho do solo com três tipos de condução térmica. Os investigadores concluíram que a condutibilidade térmica é menos importante que a profundidade a que o sistema está enterrado uma vez que, com um solo 8x mais condutor apenas foi possível obter uma melhoria de 11% no desempenho, o que neste caso representou uma diferença de 1.7 °C.

Ainda com o recurso a *software* FLUENT, Bezyan *et al.*, (2015), criaram um permutador água-solo em espiral, de modo a compará-lo com os mais comuns, ou seja, permutadores em U e em W. A utilização deste permutador foi simulada através do referido *software* alterando vários parâmetros antes de ser aplicado em testes reais. A grande diferença deste estudo foi que o solo usado em volta do tubo era cimento e não terra ou areia como usual. Esta alteração trouxe a vantagem de se usar menos área de solo e assim diminuir os custos. Este equipamento foi testado para funcionar como auxiliar de uma bomba de calor, para que no verão removesse o calor ambiente e o dissipar no solo. Para comparar os três tipos de permutadores, usaram a mesma velocidade da água (0,3 m/s), como também o tamanho dos tubos (25 m), com uma profundidade de 10 m para o permutador em espiral e aproximadamente 1 m para o formato em “U” e “W”. Os autores do estudo determinaram que o permutador em espiral conseguia ser 2 vezes mais eficaz que os outros dois tipos estudados, tendo obtido uma diferença na temperatura à saída em relação à entrada na ordem de 7.7 °C, enquanto que com os permutadores do tipo “U” e “W” tiveram uma relação de 2,8 °C e 3,4 °C, respetivamente.

Mohammed Benhammou e Belkacem Draoui (2015) construíram um modelo unidimensional para estudar o desempenho de um permutador ar-solo no arrefecimento de edifícios na Argélia, Sahara. O estudo foi realizado no mês de julho onde o consumo de energia para o arrefecimento é superior. Como metodologia recorreram a um estudo paramétrico para perceber os efeitos da geometria do tubo, assim como os parâmetros dinâmicos que influenciavam o seu desempenho. Assim sendo, definiram um tubo em PVC com uma espessura de 5 mm onde o

diâmetro e o seu comprimento se mantinham como incógnitas. O sistema de alimentação de ar era composto por um ventilador que captava ar do meio ambiente e o forçava para o permutador onde era arrefecido, acabando por sair no interior de uma habitação. Após diversos testes determinaram que a diminuição do diâmetro do tubo de 30 cm para 10 cm arrefecia mais 1 °C o ar a saída, da mesma maneira em que o ar saía mais frio com um comprimento de 50 m em relação a um de apenas 20 m. O estudo concluiu também ser possível baixar 1 °C na temperatura à saída diminuindo a velocidade do ar de 5 m/s para apenas 2 m/s.

M. Bojic *et al.* (1997) estudaram um sistema de permutador ar-solo com a funcionalidade de pré-aquecimento do interior de um edifício assim como o respetivo pré-arrefecimento. Os autores fizeram uma análise matemática de forma a encontrar os valores do comprimento do tubo e o respetivo diâmetro, assim como a velocidade do ar e a profundidade a que o permutador deveria ser enterrado. Com o solo a fornecer uma temperatura de 8 °C no inverno e 16 °C no verão, tornava-se mais viável a sua utilização nos meses de verão para arrefecimento. Uma das conclusões retiradas foi que a 2,1 m de profundidade e com 4 tubos de cobre com um comprimento de 50 m cada, o seu rendimento era apenas três vezes superior, comparativamente a apenas um tubo de 50 m.

Ainda referente a aplicações diretas, A. Chel (2009) refere a aplicação de um permutador ar-solo em Nova Deli, Índia como o objetivo de arrefecer uma habitação com 238 m³. Para tal foi feito um permutador com 78 m de comprimento, em serpentina, espaçado por 0,6 m, tendo apenas 6 cm de diâmetro. Este permutador foi enterrado a 1,5 m de profundidade. O circuito do permutador era fechado, com renovação de ar apenas pelas janelas e portas do edifício. O autor conseguiu demonstrar uma poupança de mais de 10.000 kWh por ano, o que representa aproximadamente 340 €/ano, tendo o investimento sido amortizado em menos de 2 anos.

Ainda na Índia, M.K. Ghosal e G.N. Tiwari (2006) investigaram o potencial da energia térmica acumulada do solo para o aquecimento e arrefecimento de uma estufa, num local onde as temperaturas rondam os 45 °C no verão e os 6 °C no inverno. Para tal recorreram ao uso de um permutador ar-solo enterrado a apenas 1 m de profundidade. Este sistema era composto por tubos em PVC em serpentina de 8 curvas separados também por 1 m de distância, tendo o tubo um comprimento de 39 m e 6 cm de diâmetro interno. Para auxiliar a passagem de ar forçado, foi colocado um ventilador com 0,5 HP de potência onde era possível obter um fluxo de ar na ordem dos 100 kg/h de ar. O solo era composto essencialmente por areia sedimentar e uma pequena percentagem de argila. A validação experimental de um ensaio em simulação numérica, onde foram inseridas todas as variáveis e condições de operação. O sistema permitiu o aumento da temperatura no interior da estufa durante o inverno de 7 °C (passando de apenas 6 °C para 13 °C) e uma diminuição da temperatura perto dos 6 °C (uma redução dos 45 °C para 39 °C).

Outra aplicação do permutador ar-solo em estufas na Índia foi desenvolvida por Sharan *et al.* (2004) quando foi aplicado o sistema a uma estufa de produção de tomate, com um volume de

360 m³. O objetivo do permutador foi o aquecimento do interior da mesma tendo sido possível aumentar de 15 °C para uns favoráveis 22 °C nas noites de inverno. A utilização deste equipamento teve também o propósito de arrefecimento nos períodos mais quentes do ano tendo baixado a temperatura no interior da estufa na ordem dos 7 °C. O permutador era constituído por duas filas de tubo enterradas a profundidades de 2 m e 3 m, respetivamente, sendo constituídas cada uma delas por quatro tubos de aço espaçados entre si de 1,5 m tendo 23 m de comprimento e um diâmetro de 0,20 m. Com esta aplicação foi possível obter 2,7 vezes mais de produção de tomate e uma poupança no consumo de água perto dos 34%.

J. Sanjeev *et al.* (2014) optaram por criar um sistema híbrido, ou seja, aplicaram um permutador ar-solo interligado a um aquecedor solar. O modo de funcionamento passava por fazer entrar o ar pela entrada do permutador onde era aquecido a uma profundidade de 3,7 m ao longo de 60 m. O ar era forçado através de um ventilador com uma potência de 0,75 kW podendo chegar a um caudal máximo de 0,0945 m³/s. Após a passagem pelo permutador, o ar já aquecido passava numa estrutura em forma de U na horizontal, colocado na lateral do edifício, virado para o sol. Desta forma foi possível aumentar até 68% a temperatura à saída do sistema em relação à temperatura de entrada no permutador. Em termos energéticos, esta aplicação melhorou a sua capacidade de aquecimento de 1217,625 kWh para 1280,753 kWh.

K. Mahamed *et al.* (2016) relataram uma experiência realizada em Marrakech, Marrocos, onde foi aplicado um permutador ar-solo com o intuito de arrefecimento de uma habitação. Antes da sua implementação, todo o sistema foi simulado em *software*, TRNSYS (tipo 460). O sistema foi configurado para ter três tubos com um comprimento de 72 m cada e com um diâmetro interno de 15 cm, enterrados entre 2,2 m e 3,2 m de profundidade. Deste modo foi possível diminuir a temperatura à saída do permutador até aos 25 °C enquanto a temperatura ambiente era de 45 °C.

Pfafferott (2003) estudou experimentalmente o desempenho térmico e energético de um tipo específico de permutador ar-solo. Instalou no total três sistemas, para três edifícios independentes, situados em zonas diferentes na Alemanha. No primeiro caso, situado na cidade de Hamm e de forma a climatizar os 6000 m² foram instalados 26 tubos a uma profundidade compreendida entre 2 m e 4 m. Estes tubos apresentavam um diâmetro de 0,25 m e o seu comprimento variava entre os 67 m e os 107 m. O sistema de ventilação foi dimensionado de forma a obter um caudal médio de 10.300 m³/h. Quando utilizado para refrigeração, foi possível obter uma diminuição de cerca de 10 °C no interior dos edifícios, relativamente a temperatura exterior; já quando usado para e para aquecimento, o sistema provou ser capaz de aumentar em 7 °C o valor da temperatura no interior do edifício, face à temperatura ambiente. Deste modo foi possível obter, em termos energéticos e em período de inverno, uma energia equivalente a 27,700 kWhano e 22,300 kWhano, em período de verão.

No caso do segundo edifício, localizado em Freiburg, tinha uma área total de 13150 m². Os sete tubos utilizados apresentavam 95 m de comprimento com 0,25 m de diâmetro, enterrados a

uma profundidade de apenas 2 m. Com um caudal de 7000 m³/h foi possível uma redução de cerca de 13 °C no período de verão. Desta forma o sistema provou um potencial de conservação energético anual de 26,800 kWh para o aquecimento e 12,400 kWh, em período de arrefecimento.

O último edifício, em Weilheim, apresentava uma área de apenas 1000 m². Para esta situação foram usados dois tubos de 90 m de comprimento com um diâmetro de 0,35 m e enterrados a uma profundidade de 2,3 m. Com um caudal de 1100 m³/h foi possível um aumento de 17 °C no período de aquecimento e uma diminuição de 13 °C face à temperatura ambiente.

Outro trabalho desenvolvido com o permutador a servir de apoio num sistema em série foi desenvolvido por Barakat *et al.*, (2016). Para melhorar o rendimento de uma turbina a gás um dos fatores é a temperatura do ar na entrada da mesma. Quanto mais fria for, melhor, e nesse contexto, os autores desenvolveram um modelo matemático com o objetivo de prever a potência de saída da turbina e também a sua eficiência com a aplicação de um permutador ar-solo. Este estudo ocorreu na empresa New Gas Damietta, no Egito. Devido ao facto de ser necessário um grande caudal de ar foi necessário enterrar 853 tubos a 5 m de profundidade com um comprimento de 85 m e 0,35 m de diâmetro. Desta forma foi possível diminuir o consumo específico de combustível em 4,4% e aumentar a sua eficiência térmica em 4,8%, tendo sido melhorado o conjunto em 9,2%. A análise económica demonstrou que era possível diminuir o consumo de combustível em 1570 toneladas por ano e aumentar em 12991 MWh/ano a energia gerada. O retorno deste investimento foi possível em apenas um ano e 3 meses.

Uma aplicação menos convencional de um permutador ar-solo foi orientada por Sharan *et al.* (2002) onde os autores dimensionaram um permutador ar-solo para atenuar as grandes diferenças de temperatura sentidas ao longo do ano dentro de uma jaula de um tigre na cidade de Ahmedabad, na Índia. Desta forma foi feito um permutador com 2 tubos de 0,2 m de diâmetro, distanciados por 1,5 m com 20 m cada um e enterrados a 1 m de profundidade. O volume total a climatizar foi de aproximadamente de 200 m³. Foi possível atenuar em 10 °C o valor máximo e mínimo do interior da jaula, mesmo estando aberta em alguns casos.

2 - Armário de telecomunicações

2.1 - Introdução

Os armários de telecomunicações fazem parte de um conjunto maior denominado de estação base de transmissão, EBT ou da sigla em inglês BTS. Estas estações base de transmissão têm como finalidade a transmissão de informação sem fios para os dispositivos móveis. A tecnologia presente nas estações pode ser de natureza variada, podendo ser Wi-Fi, 2G até 5G, para operadoras de redes de telecomunicação ou até mesmo comunicação via satélite, Bianco *et al.*, (2009). No mercado existem armários com diferentes configurações, podendo ter um tamanho bastante reduzido, onde se encontra equipamento mais compacto e simples, ou armários de dimensão superior em que é possível alojar diversos dispositivos de tamanho superior, Lubritto *et al.*, (2011). Estes armários encontram-se espalhados nas mais diversas zonas do planeta, quer sejam zonas frias ou quentes, húmidas ou secas, Kaptein, (2014). Desta maneira, qualquer equipamento exposto a condições extremas do exterior deve ser protegido de forma a manter o seu correto funcionamento, protegendo-o quer de danos físicos, que possam ser causados propositadamente, quer danos causados pelo meio ambiente onde estão inseridos.

Para o equipamento funcionar sem interrupções, é necessário operar dentro de uma margem tolerável de valores. Seja para o movimento, entenda-se forças G, para a pressão atmosférica, indicada em kPa, temperatura, em graus Celsius, humidade, em valores relativos e tensão de alimentação. Qualquer um destes fatores pode gerar um mau funcionamento do equipamento e como tal é necessário monitorizar todos os parâmetros. Devido ao facto de os dispositivos estarem dentro de um armário previamente dimensionado e preparado para o efeito podemos descartar o seu movimento e em relação à humidade, as normas de fabrico do armário não permitem que os seus valores não passem dos limites recomendados pelo fabricante do equipamento. A pressão atmosférica também não varia excessivamente para o mesmo local, podendo também ser descartada. Em relação à alimentação elétrica, as fontes de alimentação que são concebidas para o efeito, têm todas sistemas de proteção para uma eventual sobrecarga ou falha de energia. Sendo assim o parâmetro que resta analisar e controlar é a temperatura, Rodgers e Evely, (2004).

Nestes armários exteriores o equipamento que mais consome energia é o sistema de arrefecimento, daí haver a necessidade de haver mais estudos para poder melhorar e aperfeiçoar o sistema, Roy, (2008). No presente capítulo serão apresentadas as diferentes formas de arrefecimento e as respetivas características, bem como as suas vantagens face ao tradicional sistema de ar condicionado. Será também apresentado um estudo sobre a evolução dos dispositivos de telecomunicação e de que forma a sua evolução permitiu uma melhor eficácia não só em termos tecnológicos, mas também em termos funcionais.

2.2 - Evolução das tecnologias de telecomunicações moveis

A palavra telecomunicação provém de duas palavras, *tele* da palavra grega “distante” e da palavra do latim *communicare*, “partilhar”, “conferenciar”. Foi adaptado para o vocabulário atual pelo engenheiro francês Édouard Estaunie, no ano 1904. Antes da era digital, a comunicação processava-se através de cartas ou se recuarmos ainda mais atrás, era feita com recurso a animais, em que o tempo de recção era de vários dias senão mesmo meses.

Com o desenvolvimento da tecnologia, com o melhoramento dos circuitos integrados e a produção em massa de componentes eletrónicos surgiu então a digitalização das chamadas telefónicas e como subsequente o envio e receção de dados digitais. Esta nova era da telecomunicação só ficou disponível ao público na década de 90 e em zonas muito povoadas, uma vez que existiam poucas estações base de telecomunicação espalhadas pelo território nacional e internacional, Edler e Lumbberg, (2004).

As primeiras estações base para efeitos de telecomunicação serviram a tecnologia de primeira geração, denominada mundialmente por 1G. Este tipo de tecnologia era muito rudimentar e não apresentava qualquer tipo de segurança na transferência de dados de voz. A segunda geração, do serviço de telecomunicações, veio essencialmente para colmatar as falhas da primeira geração alterando a transmissão de analógico para digital. Esta geração deu o maior salto nas redes móveis, já que as operadoras conseguiram disponibilizar mais serviços, como por exemplo o SMS ou GPRS em que já era permitido aos utilizadores transferirem dados como músicas e imagens.

No ano de 2000, com a terceira geração, houve um maior investimento nas infraestruturas espalhadas ao longo de todo o território, muito devido ao aumento de subscrições de serviços por parte dos clientes, provocando um aumento do tráfego de dados móveis, o que obrigou inerentemente ao aumento do número de estações base de telecomunicação. Na atualidade, o serviço 4G já está disponível e com ele a maior possibilidade de novos serviços.

Tabela 2.1 - Comparação das características de cada tecnologia. Adaptado de bilimtreni.com, (2015)

Tecnologia	Velocidade real		Velocidade anunciada		Disponível	
	Download	Upload	Download	Upload		
2.5 G	GPRS	32-48Kbps	15Kbps	114Kbps	20Kbps	Sim
2,75 G	EDGE	175Kbps	30Kbps	384Kbps	60Kbps	Sim
3G	UMTS	226Kbps	30Kbps	384Kbps	64Kbps	Sim
	W-CDMA	800Kbps	60Kbps	2Mbps	153Kbps	Sim
	EV-DO Ver.A	1Mbps	500Kbps	3.1Mbps	1.8Mbps	Sim
	HSPA 3.6	650Kbps	260Kbps	3.6Mbps	348Kbps	Sim
	HSPA 7.2	1,4Mbps	700Kbps	7.2Mbps	2Mbps	Sim
4G	WiMAX	3-6Mbps	1Mbps	100Mbps+	56Mbps	Sim
	LTE	5-12Mbps	2-5Mbps	100Mbps+	50Mbps	Sim
	HSPA+	-	-	56Mbps	22Mbps	Sim
	HSPA 14	2Mbps	700Kbps	14Mbps	5.7Mbps	Sim
	WiMAX	-	-	100Mbps	60Mbps	Sim
	LTE Advanced	-	-	100Mbps	-	Sim

Fonte: Adaptado de bilimtreni.com, (2015)

Os sistemas de telecomunicação acompanham de forma natural a evolução da tecnologia. Esta evolução torna possível ter cada vez mais equipamentos de melhor eficácia, mais compactos face aos anos anteriores e, dessa forma, melhorar todos os serviços prestados pelas operadoras aos seus clientes. Uma estação base de telecomunicação consegue ter equipamentos com as mais diversas tecnologias, uma vez que ainda existem dispositivos móveis que só estejam habilitados a tecnologias mais antigas.

Deste modo, os equipamentos têm de trabalhar numa maior gama de frequências, espectros, amplitudes de onda e potências de emissão, por forma a garantir que todos os serviços estejam cedidos ao cliente. Por consequência, os dispositivos, durante o seu funcionamento, dentro dos armários das estações base, tendem a libertar bastante calor sob a forma de energia térmica dissipada, Riches e Johnston, (2015).

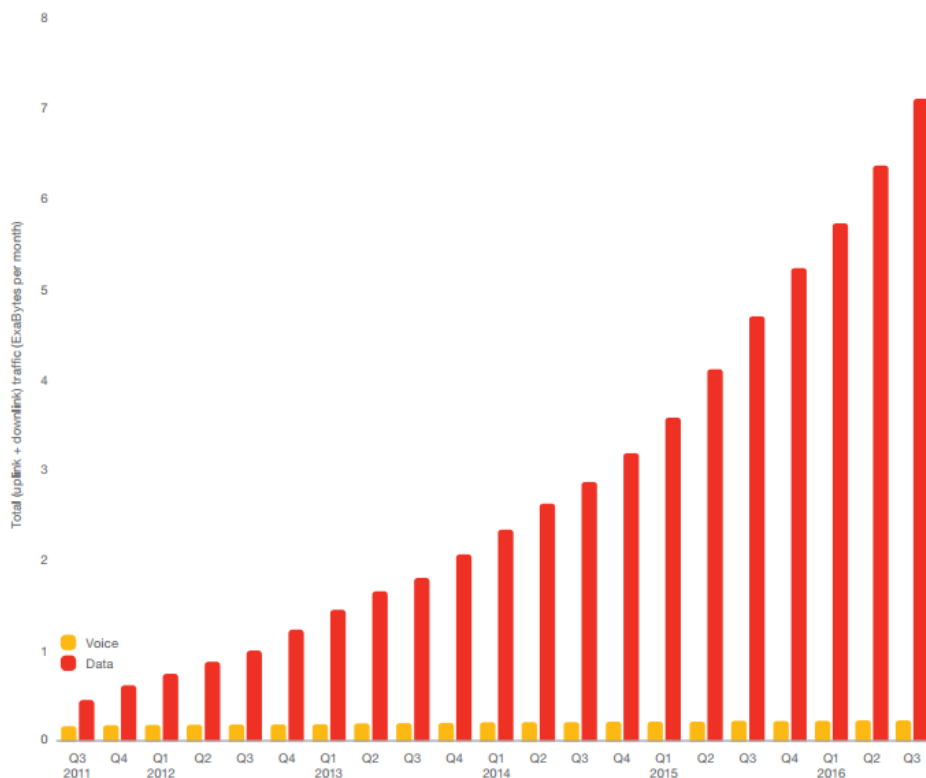


Figura 2.1 - Tráfego móvel em todo o mundo compreendido entre 2011 até 2016. Ericsson, (2016)

2.3 - Influência da temperatura nos equipamentos eletrônicos

Qualquer equipamento eletrônico necessita de operar dentro de uma gama de temperaturas aceitáveis de modo a não danificar os seus componentes internos (Lakshminarayanan e Sriraam, 2014). Apesar de todos os esforços dos fabricantes de semicondutores ao longo dos anos, o calor dissipado no mesmo volume está a aumentar gradualmente, Nörtershäuser *et al.*, (2014). De forma a remover toda esta carga térmica gerada nos equipamentos, os fabricantes de armários recorrem a várias técnicas de arrefecimento. Esta temática será abordada no capítulo 2.4 desta dissertação, de forma a perceber como é que o calor é gerado, circula e é absorvido para dentro do armário, sendo também demonstrados efeitos nos equipamentos, devido a esse fenómeno.

Existem outras causas que levam à diminuição da vida útil e posterior falha completa dos equipamentos eletrônicos no interior dos armários levando assim um aumento dos custos. O gráfico da figura 2.2 apresenta essas causas, onde se pode constatar que a principal causa é a temperatura.

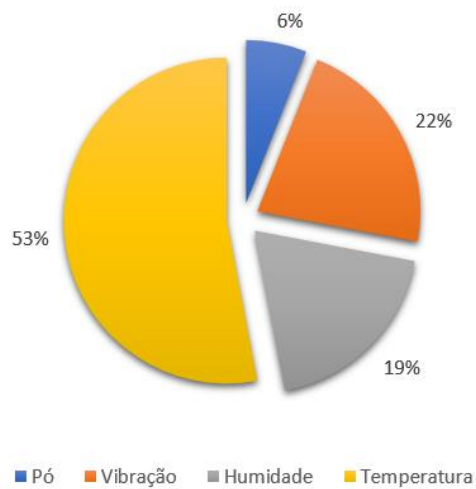


Figura 2.2 - Principais fatores que levam a diminuição da vida útil dos equipamentos. Adaptado de Zang *et al*, (1997)

Por estes motivos é então necessário estudar técnicas de arrefecimento e perceber como é que o calor é gerado e acumulado no interior do armário. Vários modelos de análise de falhas dos equipamentos, permitiram determinar varias consequências, das quais se salientam a corrosão, electro migração, contaminação, oxidação e defeitos de montagem. Qualquer uma destas falhas é um fator que influencia a fiabilidade do equipamento com o aumento da temperatura, V.Lakshminarayanan e N.Sriraam, (2014). Outro fator importante é que sempre que a temperatura ultrapassa em 10 °C o valor limite estabelecido pelo fabricante, o tempo de vida útil desce para 50%, 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.

Desta forma é importante manter a temperatura abaixo do valor limite de funcionamento dos equipamentos, de modo a prolongar o seu tempo de vida útil e por consequência a redução dos custos de reparação ou substituição. Segundo Haghghin (2005), o calor gerado dentro de uma estação base de telecomunicação pode ser determinado da seguinte forma:

$$Q_{armario} = Q_{equip} + Q_{envol} + Q_{sol} + Q_{inf} \quad (2.1)$$

Em que:

- $Q_{armario}$ = Carga térmica do armário, W;
- Q_{equip} = Emissão térmica dos equipamentos elétricos, W;
- Q_{envol} = Calor absorvido por condução e convecção, W;
- Q_{sol} = Calor absorvido por radiação solar, W;
- Q_{inf} = Calor absorvido através de infiltração de ar quente, W.

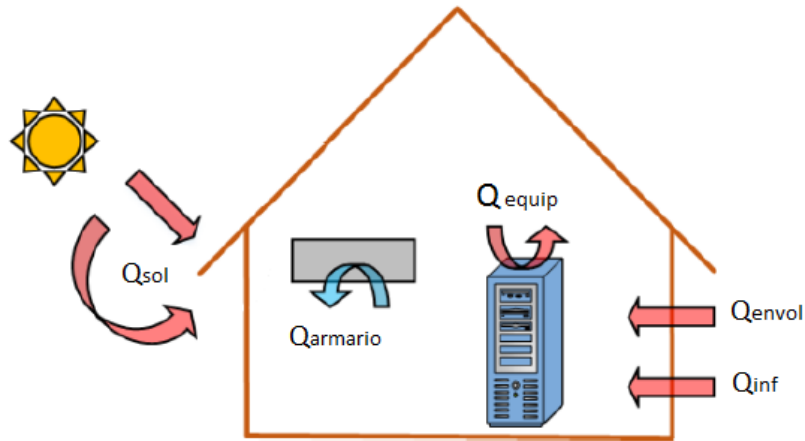


Figura 2.3 - Representação das diversas formas de aquecimento. Hahighi, (2016)

Uma dessas formas é o próprio calor libertado por efeito de Joule, Q_{equip} , pelos diversos elementos eletrônicos que constituem os equipamentos. O fluxo de elétrons através de um material é a correta designação de corrente elétrica. Sempre que há transferência de energia através de um condutor de um elemento para o outro dissipa-se energia térmica devido ao efeito de Joule. Isto acontece porque todos os elementos possuem um valor de resistência elétrica por mais baixo que seja. Quando existe resistência na passagem de um elétron, parte da sua energia é convertida em energia calorífica e desse modo dissipada para o exterior.

Uma forma de conduzir o calor gerado por este mesmo efeito dentro do armário de telecomunicações é através da condução e convecção pelas paredes e pelo ar circundante, Q_{envol} . O fenómeno de condução resulta da propagação de vibrações a nível molecular. Isto ocorre em qualquer material, mas é mais intensa nos materiais sólidos, depois líquidos e por fim nos gasosos onde a condução é muito difícil de ocorrer. Para que exista o fenómeno de condução, é necessário haver uma diferença de temperatura entre os dois materiais e como tal o fluxo de calor é regido através da equação de Fourier:

$$\dot{Q}_q = k * A * \frac{\Delta T}{L} \quad (2.2)$$

Em que:

- \dot{Q} = Taxa de transferência de calor, W;
- k = Condutibilidade térmica, W/m K;
- A = área da superfície transversal, m²;
- L = distância entre as duas superfícies, m.

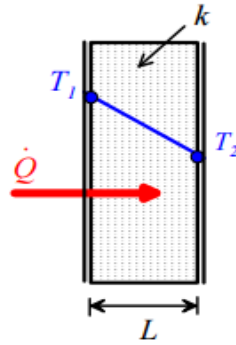


Figura 2.4 - Transferência de calor por condução. Oliveira, (2014)

O valor da condutibilidade térmica é diferente para cada tipo de material já que é a propriedade definida pela estrutura física do material, química e temperatura a que está sujeito. É então uma propriedade definida como a energia térmica transferida por unidade de área por uma determinada unidade de tempo. Quando o valor da condutibilidade é baixo, pode-se dizer que é um material bom isolante térmico. A tabela 2.2 apresenta alguns materiais mais comuns e a sua condutibilidade térmica.

Tabela 2.2 - Condutibilidade térmica de alguns materiais

Material	Condutibilidade térmica k [W/m.K]
Diamante	2300
Prata	429
Cobre	401
Ouro	317
Vidro	0.78
Água	0.613
Poliuretano	0.026

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2014

O fenômeno de convecção, segundo Cengel (1998), é a forma como a energia se transfere entre a superfície de um sólido e um líquido ou gás adjacente que está em movimento, envolvendo-se os efeitos combinados de condução e movimento de fluido que ocorre entre uma superfície a uma determinada temperatura e um fluido envolvente a essa superfície. No caso do armário, o fluido circundante é o ar, que em contacto inicial com os componentes quentes vai aquecer por convecção. O ar vai aumentar a sua densidade e por consequência a massa volúmica aumenta relativamente ao restante ar não aquecido.

Desta forma o ar quente vai subir e espalhar-se pelo resto do armário e respetivos componentes. Como o ar tem tendência a deslocar-se é necessário ter conhecimentos de equações relativas a mecânica dos fluidos. Dessa maneira recorre-se a equações mais simplificadas que permitem o cálculo da transferência de calor.

A taxa de calor transferida para um determinado fluido é fornecida através da Lei de Newton do arrefecimento:

$$\dot{Q} = A * h * (T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

Em que:

- \dot{Q} = Taxa de transferência de calor, W;
- A = Área de superfície de transferência, m²;
- h = Coeficiente de transferência de calor por convecção, W/m² K;
- T_s = Temperatura de superfície de transferência, K;
- T_∞ = Temperatura do fluido longe da superfície de transferência, K.

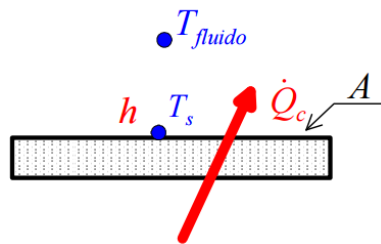


Figura 2.5 - Transferência de calor por convecção. Oliveira, (2014)

Para ajudar no arrefecimento dos armários de telecomunicação, recorre-se muitas das vezes a ventiladores de modo a extrair o ar quente do interior dos mesmos. Isto faz com que a convecção deixe de ser natural e passe a ser forçada alterando assim os valores do coeficiente de transferência de calor. A tabela 2.3 mostra alguns valores típicos para o coeficiente convectivo.

Tabela 2.3 - Coeficiente convectivo

Tipo de convecção	h [W/m.K]
Livre, gases	2 - 25
Livre, líquidos	10 - 1 000
Forçada, gases	25 - 250
Forçada, líquidos	50 - 20 000
Evaporação, condensação	2 500 - 100 000

Fonte: Oliveira, 2014

A radiação térmica, Q_{sol} é uma outra forma de aquecimento no interior destes armários. Esta forma de transferência de calor consiste no transporte de energia por meio de ondas eletromagnéticas. Este tipo de transferência de energia não necessita de um meio material para se propagar. A radiação térmica corresponde à radiação eletromagnética emitida por um corpo como resultado da sua temperatura, Oliveira, (2014). Neste caso, o corpo emissor da radiação térmica é o sol. A lei de Stefan-Boltzmann permite calcular, em determinadas condições, a taxa líquida (balanço) de transferência de calor por radiação entre uma determinada superfície e o conjunto das superfícies que a rodeiam. A taxa de emissão de uma superfície com uma determinada área e emissividade é regida pela seguinte maneira:

$$Q_r = A * \varepsilon * \sigma * (T_{Saida} - T_{Entrada}) \quad (2.4)$$

Em que:

- \dot{Q}_r = Taxa de transferência de calor por radiação, W;
- ε = Emissividade;
- σ = Constante de Stefan-Boltzmann, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$;
- T_{Saida} = Temperatura da superfície, K;
- $T_{Entrada}$ = Temperatura do fluido longe da superfície de transferência, K.

Para evitar o máximo deste tipo de absorção de energia térmica, os materiais de construção dos armários são orientados para satisfazer essas necessidades, nomeadamente uma pintura clara e aplicação de material isolador como é explicado no capítulo seguinte.

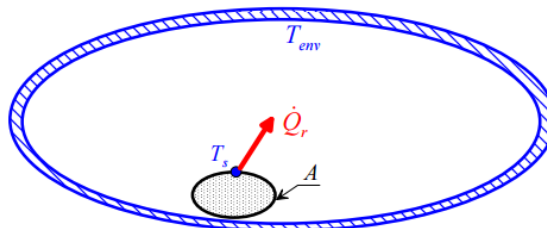


Figura 2.6 - Transferência de calor por radiação. Oliveira, (2014)

A infiltração de ar quente pelo exterior, Q_{inf} , é também um método de aquecimento dos armários. Isto ocorre quando há passagem de ar quente proveniente do exterior para o interior do armário quando este está em arrefecimento, demorando mais tempo a obter a temperatura desejada. Este fenómeno ocorre na maioria dos casos onde o sistema de ventilação forçada, direciona o ar exterior a temperatura ambiente para arrefecimento dos componentes eletrónicos.

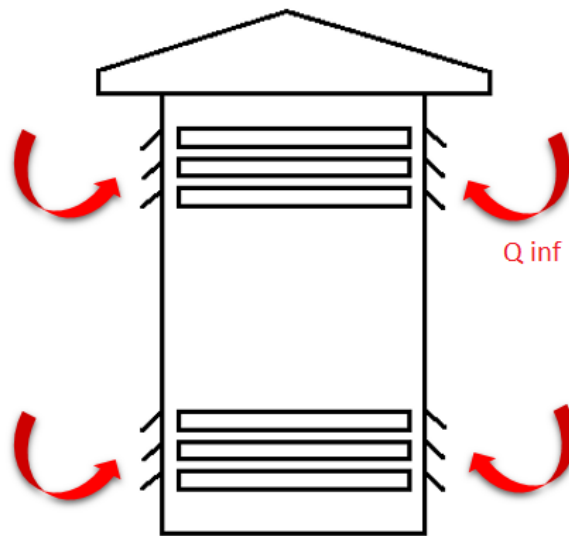


Figura 2.7 - Infiltração de calor através das entradas de ar

2.4 - Técnicas de arrefecimento de armários de telecomunicações

Com o número crescente de instalações de estações base de telecomunicações, houve a necessidade de uma melhor gestão no consumo energético das mesmas (Lubritto *et al.*, 2011). Em 2013 havia perto de 1,15 biliões de estações base de telecomunicação só na China e a sua tendência será de elevado crescimento (Sun *et al.*, 2015). Estima-se que estas estações base de telecomunicação consumam 1% de toda a energia global (Roy., 2013). Com o intuito de diminuir este consumo, diversos autores e investigadores refletiram e debruçaram-se sobre esta temática de modo a determinar novas técnicas de arrefecimento. Não só o número de infraestruturas aumentou, como também a necessidade de qualidade de serviço disponibilizada pelas operadoras aos seus clientes e, como tal, os seus equipamentos sofreram melhorias ao longo dos últimos anos permitindo assim compactar mais dispositivos eletrónicos na mesma área útil. Indubitavelmente aumentou o calor gerado pelos mesmos. (Moore e Shi, 2014).

Uma técnica que se demonstra bastante eficaz para armários de grandes dimensões é usar não um, mas dois armários, de modo a dividir a carga térmica gerada pelos equipamentos dentro do armário e assim otimizar o arrefecimento. Este método redireciona todo o sistema de alimentação de ar-condicionado, com as respetivas baterias e retificadores para um só armário deixando o outro livre para os equipamentos de radiotransmissão. Este sistema de armário duplo melhora substancialmente o desempenho do arrefecimento dentro do armário, Haghghi, (2016). A figura 2.8 demonstra a situação referida, onde do lado esquerdo se encontra o conjunto completo no mesmo espaço e no lado direito a separação entre o sistema de telecomunicação dos outros sistemas auxiliares.



Figura 2.8 - Demonstração do sistema de armário duplo. Haghighi (2016)

Uma versão idêntica à referida anteriormente consiste em usar os dois armários, mas com ventilação forçada entre si. A ideia é colocar uma abertura entre os armários ou fazer a recirculação do ar entre as paredes internas do armário. O ar aquecido é forçado para o exterior através da parede traseira do armário e quando o lado das baterias está exposto à radiação solar direta, os ventiladores forçam o ar de um lado para o outro de modo a baixar a temperatura no interior do armário, Mariam *et al.*, (2009).

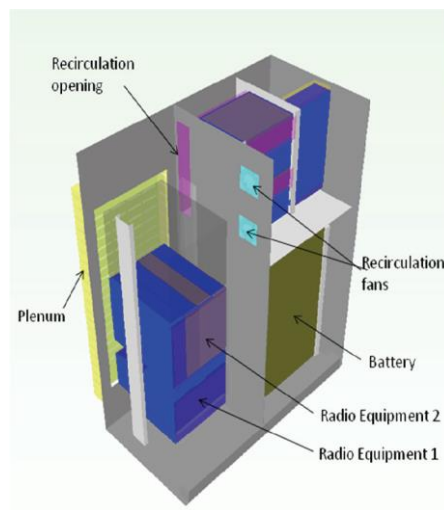


Figura 2.9 - Exemplo do esquema de recirculação. Mariam *et al.*, (2009)

Outro sistema muito atual recorre à utilização de sistemas convencionais de ar condicionado. Estes sistemas são sem dúvida o que oferece uma melhor escolha, pois recorre à compressão do líquido refrigerante, onde este absorve o calor através de uma serpentina no interior do armário e o expulsa para o exterior através de um condensador arrefecendo o interior do mesmo. Temos pressurização e despressurização de um líquido refrigerante, obtendo assim temperaturas muito baixas que de outro modo era impossível ter. A grande desvantagem deste sistema é o seu custo de aquisição, manutenção e o elevado consumo energético, Wankhede, (2007).



Figura 2.10 - Armário com sistema de ar condicionado. VIKINOR, (2017)

De modo a baixar o consumo energético foi apresentado um melhoramento onde é aplicado um economizador no sistema, que consiste em forçar ar do interior do armário de novo para a entrada do ar condicionado. Desta forma, não se atingem temperaturas tão baixas, mas solicita-se menos esforço ao sistema poupando assim recursos energéticos.

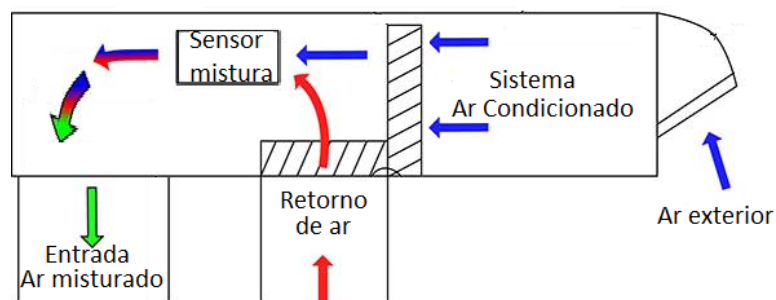


Figura 2.11 - Esquema do sistema de ar condicionado com economizador. Mariam *et al.*, (2009)

O método mais usado para compensar o sistema de ar condicionado é a ventilação através de ar forçado, em que o armário tem ventiladores localizados em pontos específicos de modo a extrair o ar quente, originado pela dissipação térmica dos equipamentos. Vários estudos foram realizados neste âmbito e a principal conclusão foi de que, quando existe uma elevada carga térmica e baixa eficiência do sistema de ar condicionado, é possível conseguir uma maior poupança em termos energéticos com a aplicação de um sistema de ar forçado bem dimensionado, Chen, (2012) e Sun, (2015).

Este método recorre ao uso de energia elétrica para fazer os ventiladores trabalhar, mas conseguem ter um enorme rendimento pois retiram grandes quantidades de calor do interior do armário com baixos custos. Os ventiladores forçam o ar mais frio a entrar no armário pelas entradas disponíveis, sendo geralmente filtrado nessa zona e, ao passar pelos equipamentos do armário aquece e sai pelas saídas designadas para o efeito que, por norma, estão colocadas no topo do armário, Chen, (2012). Uma clara vantagem do sistema é, apesar de ser um sistema ativo, ser bastante mais apelativo em termos monetários, comparativamente ao sistema de ar condicionado.

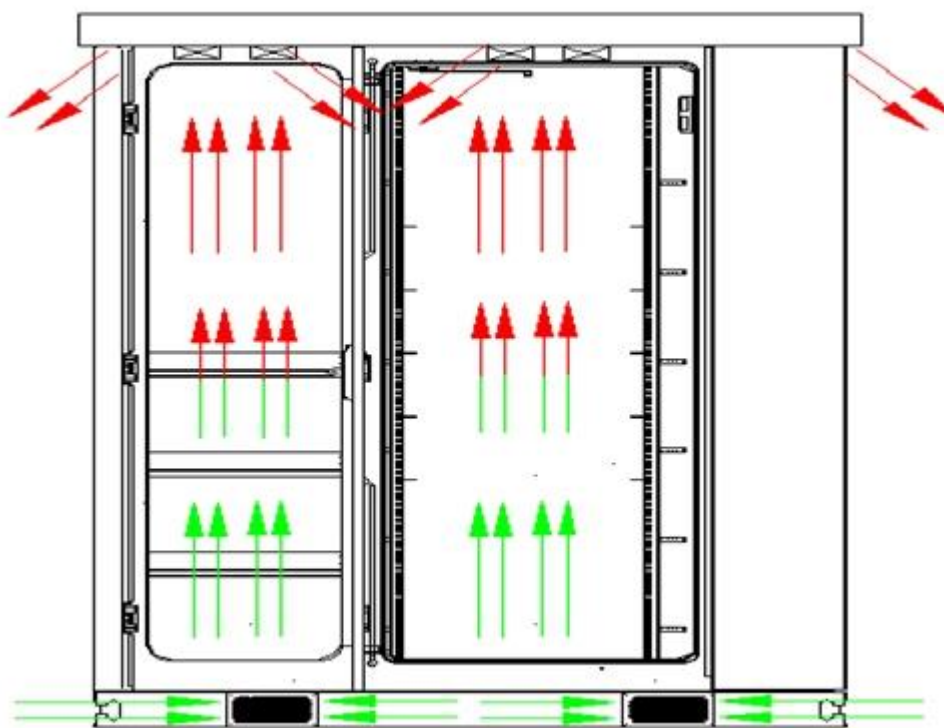


Figura 2.12 - representação do sistema de ar forçado. ESTEL, (2017)

Para além das técnicas já apresentadas, existem ainda outras maneiras de controlar a temperatura nos armários de telecomunicação. O seu revestimento, ou o material de que é feito é bastante importante. O material de eleição para a construção destes armários é maioritariamente uma liga de alumínio. A escolha deste material é devida às suas características: resistente a danos físicos e uma liga bastante leve. A sua maior desvantagem passa pela sua elevada condutibilidade térmica, através da radiação e convecção do ar à sua volta aquece o interior do armário. Para evitar esta situação, é necessário revestir a liga de alumínio com um material refletor de forma a baixar a absorção de energia térmica por radiação. Esse material pode ser uma camada de tinta que vai diminuir a absorção da energia térmica, refletindo-a, Wankhede, (2007). A figura 2.13 representa a diferença entre um armário pintado de branco, um de preto e outro sem qualquer camada de tinta.

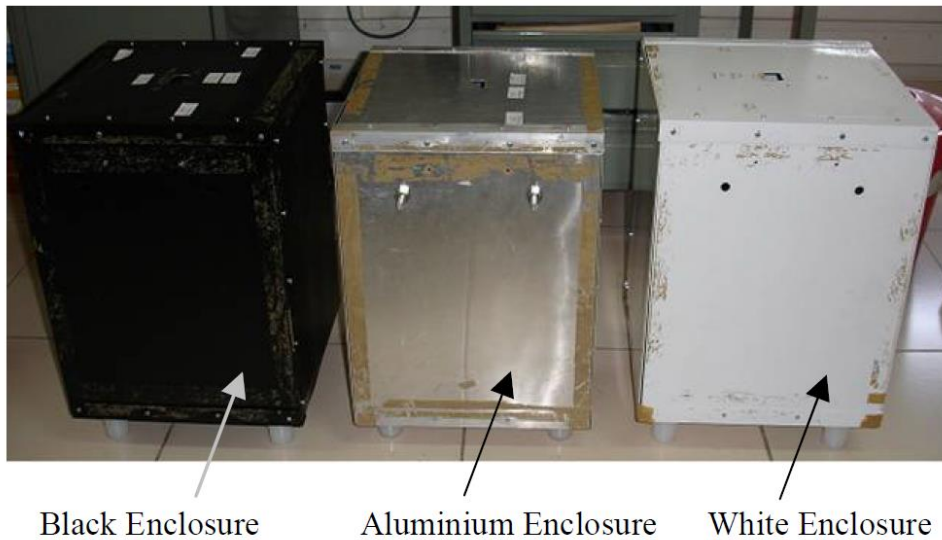


Figura 2.13 - Diferentes tipos de acabamentos. Wankhede, (2007)

O arrefecimento através do uso de água é também uma técnica por diversos autores utilizada. Este modo de arrefecimento foi estudado porque o líquido de arrefecimento, a água, tem melhores características a nível termodinâmico, nomeadamente maior condutibilidade térmica, quando comparada ao ar. Desse modo cria-se um sistema onde o fluido de transmissão de calor tem um melhor comportamento e eficácia. A grande vantagem é poder absorver o calor dissipado pelos equipamentos eletrónicos com mais eficácia pois, como mostra a figura 2.14 o permutador ar-água encontra-se encostado ao equipamento e desse modo, evita-se a propagação do calor gerado por estes para o resto dos equipamentos, diminuindo também o uso de ventiladores. A sua aplicação não é em grande escala devido ao facto de ser mais cara, pois é necessário que cada equipamento tenha o respetivo permutador e também devido aos problemas que possam surgir na sua aplicação, tais como fugas ou falhas na bomba de circulação, Nörtershäuser *et al.*, (2014). Este sistema demonstrou ser bastante eficaz.



Figura 2.14 - Unidade de radiotransmissão com permutador ar-água. Nörtershäuser *et al.*, (2014)

A técnica dos materiais de mudança de fase, ou PCM (em inglês: Phase Change Materials), não é nova e para além de ser usada na área da eletrónica, é usada também na construção civil, entre outras áreas. Estes materiais mudam de fase quando atingem determinada faixa de temperatura, ou seja, eles liquefazem ou solidificam nessa faixa de temperatura, absorvendo ou libertando energia, respetivamente. Esta técnica é considerada passiva, uma vez que não necessitam energia eléctrica para conduzir calor. Para este sistema de arrefecimento funcionar é necessário que haja uma boa diferença de temperaturas entre o interior e o exterior do armário, pois só assim ocorre a transferência da elevada temperatura no interior do armário para o exterior. Ao absorver a energia térmica, o material armazena energia sob a forma de calor sensível ou latente, onde passa de sólido para líquido. Esta energia é então transportada para o exterior onde a temperatura ambiente é mais baixa, solidificando o material, como mostra a figura 2.15. A aplicação deste sistema, juntamente com o tradicional ar-condicionado, torna possível uma poupança de 50% em custos energéticos.

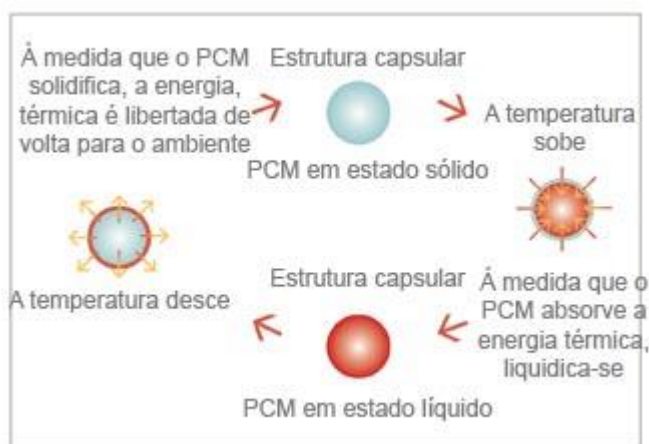


Figura 2.15 - Funcionamento de um material de mudança de fase. DAIKIN

O sistema de termosifão é muito idêntico ao anterior e permite operar, mais uma vez, sem recurso a energia eléctrica. Esta técnica consiste num circuito onde existe um evaporador e um condensador interligados por um tubo de aço. O calor gerado pelo equipamento eletrónico é absorvido para um evaporador que aquece o fluido no seu interior e, por convecção, sobe até ao condensador que se encontra fora do armário, de preferência num local onde não esteja exposto a radiação solar direta, e o fluido previamente aquecido passando do estado de vapor para o estado líquido.

Neste ponto o líquido, através da gravidade, volta a entrar no armário de volta para o evaporador onde será novamente reaquecido fechando assim o circuito (Nörtershäuser *et al.*, 2014). O rendimento do sistema depende sempre da quantidade de energia transferida do interior para o exterior e, como tal, vai depender da condutibilidade térmica dos materiais.

O evaporador é feito de cobre, constituído por duas câmaras internas para o líquido e o vapor não se misturarem tão rapidamente, estando o reservatório de líquido na zona mais baixa e através de micro furos passa para a câmara superior quando líquido passar a vapor. O condensador também é constituído por cobre, mas com apenas com uma serpentina, para que o fluido passe do estado gasoso ao líquido sem qualquer restringimento em contacto com a temperatura ambiente. Mais uma vez o rendimento do sistema vai depender da diferença de temperatura entre o interior do armário e a temperatura ambiente. Quanto maior esta for, mais rendimento terá, Samba *et al.*, (2012). A figura 2.16 demonstra o funcionamento e instalação de um sistema termossifão num armário de telecomunicações.

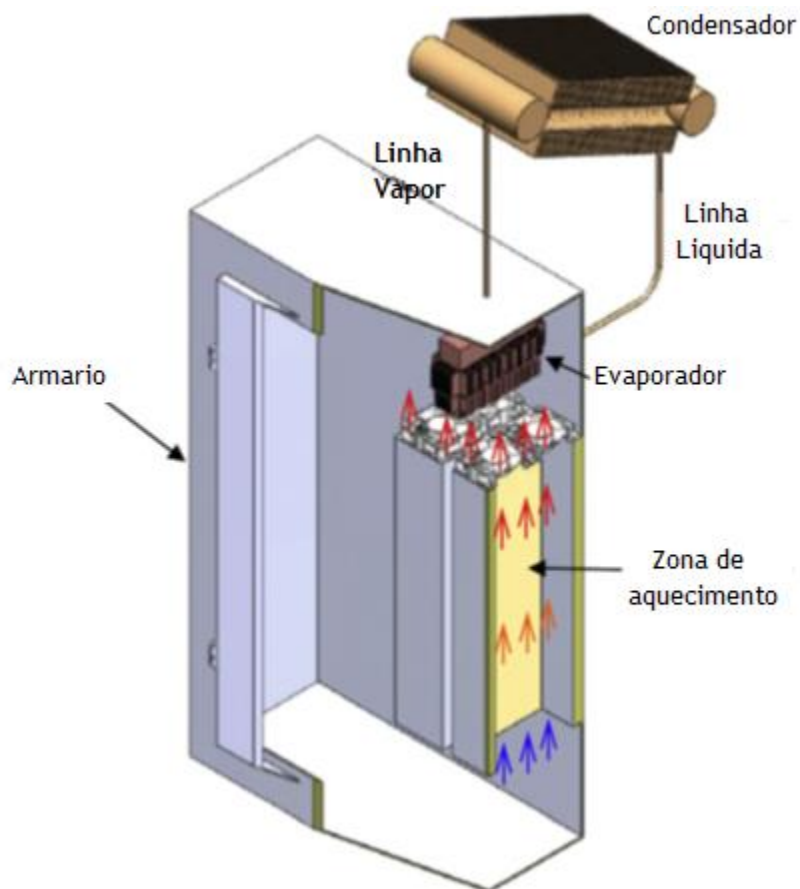


Figura 2.16 - Esquema de montagem de um sistema de arrefecimento por termossifão no armário.

Adaptado de Samba *et al.*, (2012)

No que concerne às técnicas de arrefecimento, apresentada por diversos autores, o arrefecimento através do solo é feito diretamente pelo solo ou com recurso a um permutador ar-solo ou. Este tipo de arrefecimento será estudado com mais detalhe no capítulo 4. Esta técnica de arrefecimento direto pelo solo, baseia-se em usar a inércia térmica do solo como fonte de arrefecimento. Podem ser usados túneis existentes nas cidades onde passam todos os

cabos das diversas infraestruturas nomeadamente fibra-ótica, cabos de rede, eletricidade, entre outros serviços.

Estes túneis são grandes o suficiente para garantir um bom fluxo de ar proveniente do subsolo onde a temperatura é relativamente mais baixa durante os períodos de verão, Yuping *et al.*, (2008). Com estruturas construídas para o efeito, em que é feito uma série de valas a uma determinada profundidade e enterrado um tubo com vários metros de comprimento, onde irá passar o ar vindo do meio ambiente e arrefecido dentro do tudo seguindo diretamente para o interior do armário, arrefecendo-o. É possível uma redução de até 70% no consumo de energia face ao sistema tradicional de ar-condicionado. Este sistema tem ainda a vantagem de diminuição do ruído, visto que os ventiladores estão, ou podem estar, no subsolo.

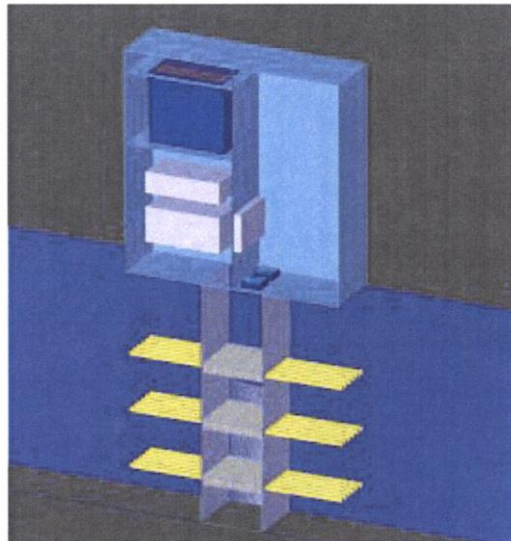


Figura 2.17 - Permutador ar-solo. Yuping *et al.*, (2008)

Existem ainda permutadores onde o fluido responsável pela troca de energia térmica é a água. Estes tipos de permutadores requerem mais manutenção e o seu desempenho vai depender bastante dos permutadores usados. Neste caso, sendo a água o fluido condutor, é necessário um permutador ar-água que recolha toda a energia térmica dissipada pelos equipamentos dentro do armário, depois, através do recurso de bombas de água, o líquido é conduzido para um sistema de tubagem enterrado no subsolo como mostra a figura 2.17. A carga térmica transportada pelo líquido será então dissipada no permutador e enviada novamente para o armário de modo a completar o circuito, Yuping *et al.*, (2009).

O permutador ar-água é uma estrutura fina de tubos em formato de serpentina e que, com o auxílio de ventiladores, consegue retirar a máxima carga térmica libertada pelos equipamentos. O permutador enterrado, água-solo, é constituído por muitos tubos finos de cobre de modo a

que o líquido tenha uma maior área de contacto com as paredes, pois caso fosse muito largo muito do líquido nunca tocaria nas paredes e manter-se-ia sempre quente.

As vantagens deste sistema são o facto de ser mais compacto dentro do armário, deixando mais espaço livre para outros equipamentos e também a nível sonoro comparado com o sistema de ventilação forçada ou de ar-condicionado. Na figura 2.18 pode analisar-se um esquema de montagem deste sistema onde: 1 representa o armário, 2 e 3 componentes eletrónicos, 4 permutador ar-agua, 5 bomba de água, 6 medidor de caudal, 7 permutador água-solo e o 8 representa o solo.

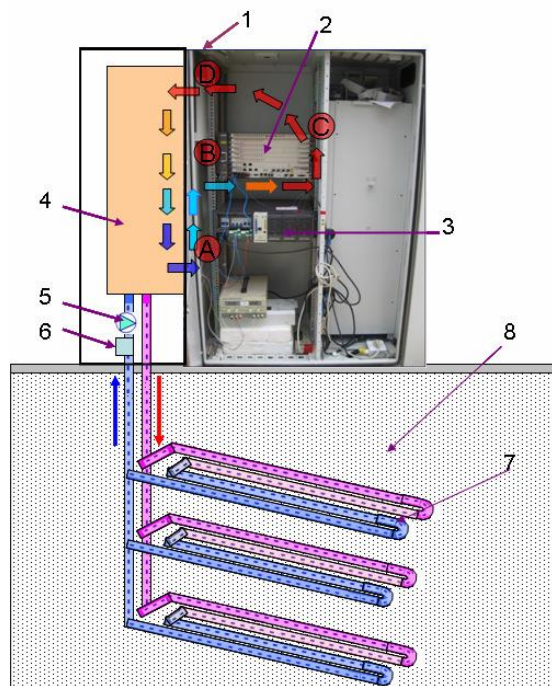


Figura 2.18 - Permutador com recurso a água. Yuping *et al.*, (2009)

2.5 - Armário em estudo

Tal como referido anteriormente, para se protegerem os equipamentos de telecomunicação e todos os respetivos aparelhos que fazem parte de toda a infraestrutura é necessário acomodá-los em determinado local. Sendo assim são usados armários cujos fabricantes respeitam as normas, de modo a que estes sejam compatíveis com todas as medidas de referência.

Estes armários estão muitas vezes colocados em zonas restritas, dentro de espaços isolados por vedações ou até mesmo em telhados, mas também podem estar colocados em zonas de fácil acesso. Para tal, os armários possuem, na sua maioria, sistemas de prevenção contra intrusos. O armário em causa é o modelo ABE_V2, propriedade da empresa Viatel. Esta empresa pertence ao Grupo Visabeira Global SGPS, S.A. sendo este o maior grupo no sector de montagem de equipamentos de telecomunicações e energia em Portugal.



Figura 2.19 - Armário ABE_V2 com alguns dos equipamentos mencionados. Delgado, (2016)

2.5.1 - Características do armário

Este modelo de armário apresenta melhorias face aos armários anteriores, uma vez que se trata da segunda versão deste modelo. É composto por três zonas distintas sendo elas: um teto com o formato de um telhado elevado no meio, de modo a que as extremidades (com ranhuras a todo o comprimento) sejam mais baixas e assim forçar o ar quente proveniente do interior a sair. A base da estrutura superior contem um orifício onde se encontram dois ventiladores sendo estes responsáveis por arrefecer o armário, através de ventilação forçada. Por fim temos o corpo do armário, local onde se alojam todos os equipamentos. Essa zona tem estrutura paralelepípedica constituída por uma armação interna onde encaixam os dispositivos de telecomunicação e restantes aparelhos. Esta estrutura está separada das tampas laterais de modo a deixar fluir o ar que entra na zona mais baixa da estrutura. Estas entradas são pequenos cortes nas duas faces e nas costas do armário, dotados de filtros de partículas e têm o corte virado para baixo de modo a que a água proveniente da chuva não entre para o seu interior. A base do armário, zona do pedestal, é uma estrutura que pode ou não ficar debaixo de terra, e que permita o suporte fixo do resto do armário ao solo. Esta serve de passagem para todos os cabos e outras necessidades entre o interior do armário e o resto do espaço envolvente, como por exemplo, a alimentação e os cabos que transmitem o sinal para as antenas.



Figura 2.20 - Vista exterior do armário ABE_V2

O armário é revestido com uma camada de tinta branca de modo a refletir o máximo de radiação solar incidente possível. Quanto à sua constituição esta é uma liga metálica denominada de Aluzinc com 55% de alumínio, 43,4% de zinco e 1,6% de silicone, Delgado, (2016). Outros aspetos importantes a salientar são a parede dupla das faces, da frente e de trás, o que cria uma bolsa de ar, evitando assim o transporte por condução de calor do exterior para o interior. Tem uma altura total de 1480 mm por 640 mm de largura e profundidade. A quantificação do espaço interior disponível para os equipamentos é medida através da norma decretada pela EIA-310. A medida é designada por Rack e unidade de medida é U, servindo para descrever a altura dos equipamentos como se pode ver na figura 2.21.

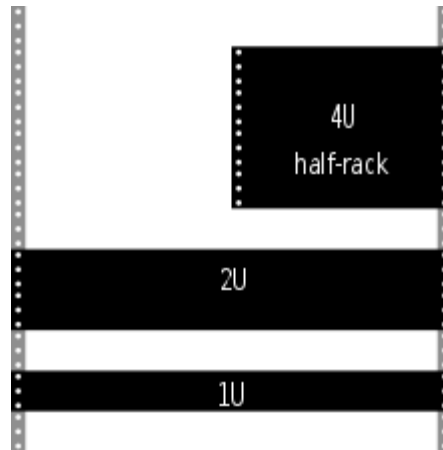


Figura 2.21 - Exemplificação da unidade Rack. 42U

Assim, 1U equivale a 1,75'' que representa 44,5 mm, enquanto 2U já equivale a 88,9 mm. Esta diferença refere-se apenas a altura de cada equipamento utilizado. A largura do mesmo tem de ser normalizada, de forma a ser compatível sendo o seu valor de 19'', equivalente a 482,6 mm. Desta maneira todos os equipamentos estão normalizados e é possível independentemente do fabricante, o seu material irá ser compatível com qualquer armário normalizado. Em suma, o armário ABE_V2 tem no total 26U, ou 1155,7 mm, disponíveis para colocação dos mais diversos equipamentos.

O arrefecimento deste equipamento é feito através da ventilação forçada por dois ventiladores montados no topo do armário. Estes ventiladores, comercializados pela empresa *EBM-PAPST*, são acionados através de termostatos localizados no topo do armário para quando a temperatura no interior do armário seja superior a 35 °C. Este valor pode ser alterado, mas é o *standard* da operadora. Este mecanismo tem a vantagem de serem acionados mais cedo evitando ter os equipamentos sujeitos a muito calor, por outro lado aumentam o consumo do conjunto. Até este valor, o arrefecimento é feito através de convecção natural orientado pela estrutura do armário e grelhas existentes nas zonas mais baixas, de modo a permitir o fluxo de ar ascendente. Os ventiladores funcionam a uma tensão de 48 VDC com uma potência de 5,1 W. A sua velocidade máxima de rotação é de 2800 rpm. permitindo um caudal de ar de 170 m³/h (*EBM-PAPST*).

2.5.2 - Equipamentos no interior do armário de telecomunicações

Para além dos equipamentos básicos que os armários dispõem, como os ventiladores e termostatos, estão geralmente equipados com todos os aparelhos necessários ao processamento e transmissão de dados. De um modo geral, há sempre um equipamento que faz a conversão AC/DC, denominado de fonte de alimentação, isto porque a maior parte dos equipamentos funciona a 48 VDC. Desta forma, existem dois quadros elétricos no seu interior, um para controlar a componente em corrente contínua e o outro em corrente alternada. Assim é possível gerir quais os equipamentos ligados e desligados protegendo-os contra surto de potenciais indesejados. Nestes equipamentos existem ainda outros elementos como o amplificador de sinal, cujo objetivo é aumentar a potência do sinal de entrada para a saída.

Em alguns casos são usados outros equipamentos, como o combinador de sinal onde é misturado mais que um sinal, mas com uma frequência ou modelação diferente de modo a que seja enviado pelo mesmo cabo até a antena, encriptadores e desencriptadores, dispositivos de filtragem de ruído e até controladores da estação base onde é monitorizada toda a infraestrutura. Os dispositivos de telecomunicação disponíveis são bastante variados, sendo que as normas utilizadas em cada zona ou país limitam a sua utilização. A sua aplicação é da responsabilidade da operadora ao qual está a ser prestado o serviço. Estes dispositivos têm a função de converter os sinais digitais recebidos fisicamente pela rede e transmitir via radiofrequência para um amplificador de sinal.

O módulo mais usado em Portugal é o Huawei BTS3900, instalado pela empresa Viatel. Este modelo já está preparado para a quarta geração de redes móveis e, como tal, está a ser implementado em todo o território nacional, conseguindo operar com mais que uma banda e portadora ao mesmo tempo. Tem uma potência térmica dissipada máxima de 295 W, Keynote Telecom Technology, (2017).



Figura 2.22 Huawei BTS3900. Huawei, (2016)

O Huawei BTS312 é outro equipamento da mesma empresa, este não é muito popular em Portugal, apesar de estar preparado para todas as tecnologias de telecomunicações. Usualmente é aplicado em zonas onde apenas existe cobertura de uma portadora, tendo uma potência térmica dissipada de 200 W, Huawei, (2011). A empresa ZTE também tem no mercado de telecomunicações vários equipamentos usados na EBT, nomeadamente o ZXSDR B8300 com 230 W de potência térmica dissipada, ZTE, (2012). Este equipamento permite um serviço multibanda e abrange todas as tecnologias de comunicação sem fios atuais.

A multinacional finlandesa Nokia apresenta também vários equipamentos na área BTS. O modelo mais usual é o ESMA, que permite operar em todas as portadoras de banda. Este tem uma potência térmica dissipada de 135 W, também muito pouco usado em Portugal. Em parceria com a Nokia, a Alcatel lançou para o mercado o modelo 9926. Este modelo processa redes 3G, 4G e está preparado também para 5G. Suporta até 8 portadoras de rede. Este é mais procurado que o ESMA da Nokia pelo facto de conseguir operar com mais portadoras de rede. Por fim, um outro equipamento muito usado em Portugal devido aos acordos entre empresas é o Ericsson RBS6601. Este dispositivo é muito usado em todo o mundo devido à sua vasta gama de frequências e número de portadoras. A potência térmica dissipada é de 295 W.

Os valores da potência térmica dissipada são relativos ao valor máximo de cada equipamento, para que isso aconteça é necessário que os dispositivos tenham todos os seus módulos ou expansões em funcionamento. O armário em estudo, o ABE_V2, apenas suporta um módulo enquanto outros armários de maior porte conseguem conter mais equipamentos no seu interior. Atendendo a que o maior valor de potência térmica dissipada é de 295 W, pode então estabelecer-se um valor máximo para o interior do armário. O valor máximo aproximado escolhido é de 450 W de potência térmica dissipada, um valor adequado para o tamanho do armário e para o seu sistema de arrefecimento mantendo-se abaixo do valor limite de 55 °C pois, para além do transmissor existem ainda outros equipamentos no interior do armário tal como já referido anteriormente. Este valor foi decidido através da soma das potências térmicas dissipadas dos diversos equipamentos no interior do armário de telecomunicações.

3 - Permutador ar-solo

3.1 - Introdução

A necessidade de uma procura por novos métodos alternativos de climatização tem vindo a aumentar ao longo do tempo. Esta procura advém do elevado consumo energético atual e do seu impacto no meio ambiente. Para tal, vários têm sido os métodos de aquecimento e arrefecimento alternativos para edifícios e espaços habitacionais. Alguns destes métodos são mais limpos, eficientes e geram menos impacto no consumo energético, e por consequência, no meio ambiente.

Uma dessas soluções recorre à energia térmica do solo, sendo esta limpa e segura, Bezyan, (2015). O sol é o responsável por esta energia geotérmica a poucos metros de profundidade. Ao longo do ano o solo vai aquecendo e arrefecendo conforme as estações, mas a sua inércia é tão elevada que a sua temperatura média ao longo de um ano é igual ao valor médio da temperatura ambiente, mas com menor amplitude térmica. Por conseguinte apresenta-se como uma fonte de energia renovável, uma vez que é possível retirar alguma dessa carga térmica, que mais tarde irá ser reposta pela própria terra e pelo sol. Já no ano 3000 A.C., no médio oriente, era usada como sistema de arrefecimento onde eram construídos túneis subterrâneos para esse fim, Manjul *et al.*, (2016).

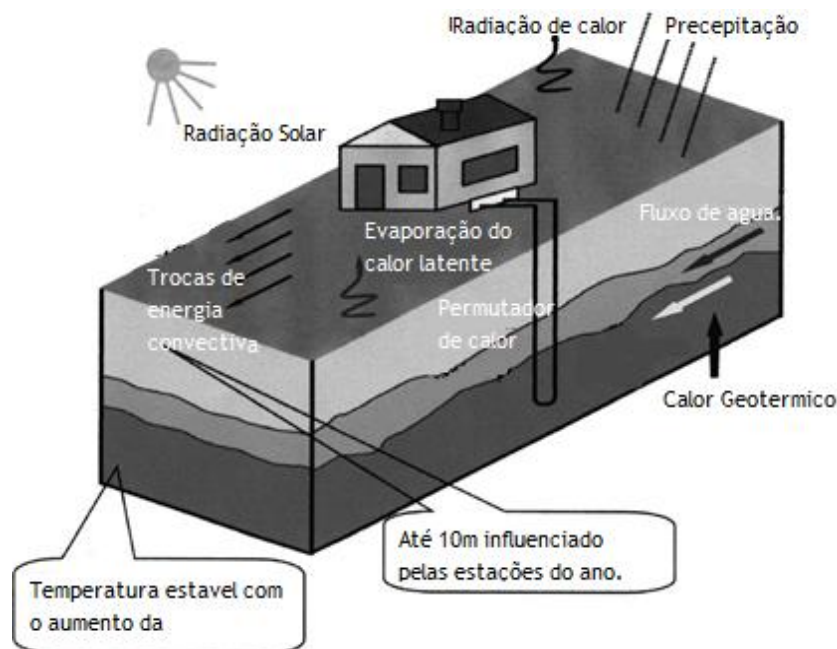


Figura 3.1 - Representação de um permutador vertical no solo. Adaptado de Hernandez *et al.*, (2007)

A temperatura a poucos metros de profundidade, entre os 5 m e os 20 m, tem tendência a manter-se na média anual do valor da temperatura à superfície. Esta temperatura é designada de temperatura do solo não perturbado, pois os efeitos das flutuações sazonais de temperatura são praticamente desprezados, representando a zona homotérmica, Lopes, (2014). Assim, durante os períodos quentes de verão, é possível ter uma temperatura no subsolo mais fria que na superfície e no inverno o inverso, ou seja, obtém-se uma temperatura no subsolo mais quente que a ambiente. Desta forma é possível utilizar o solo como um dissipador de calor, ou como fonte de calor. Por estes motivos esta é uma técnica que está em desenvolvimento com o intuito objetivo de arrefecimento e aquecimento, seja de habitações, edifícios públicos, indústrias entre outros, Manjul *et al.*, (2016).

Uma técnica passiva eficaz para aproveitar essa energia acumulada ao longo do ano no subsolo consiste na utilização de permutadores ar-solo ou água-solo, também conhecidos pela terminologia inglesa de *Earth to Air Heat Exchanger* (EAHE) ou *Earth to Liquid Heat Exchanger* (ELHE). A diferença entre estes dois permutadores é o seu fluido condutor e será explicado com mais detalhe no capítulo seguinte. Este tipo de técnica já fora inicialmente pesquisada e implementada na década de 70, mas de forma muito rudimentar e em zonas remotas acabando por ser descartada devido a vários e inúmeros entraves, Hollmuller e Lachal, (2001). Atualmente voltou a tornar-se cativante visto ser necessário responder aos elevados custos existentes de consumos energéticos para climatização de edifícios. Existem diversos artigos e aplicações reais de sistema deste tipo onde já é possível obter um elevado rendimento face aos anteriores modelos, e, desta forma, melhorar o seu potencial para a diminuição do consumo energético por parte dos tradicionais equipamentos de aquecimento e arrefecimento, como foi demonstrado na secção 1.3.3.

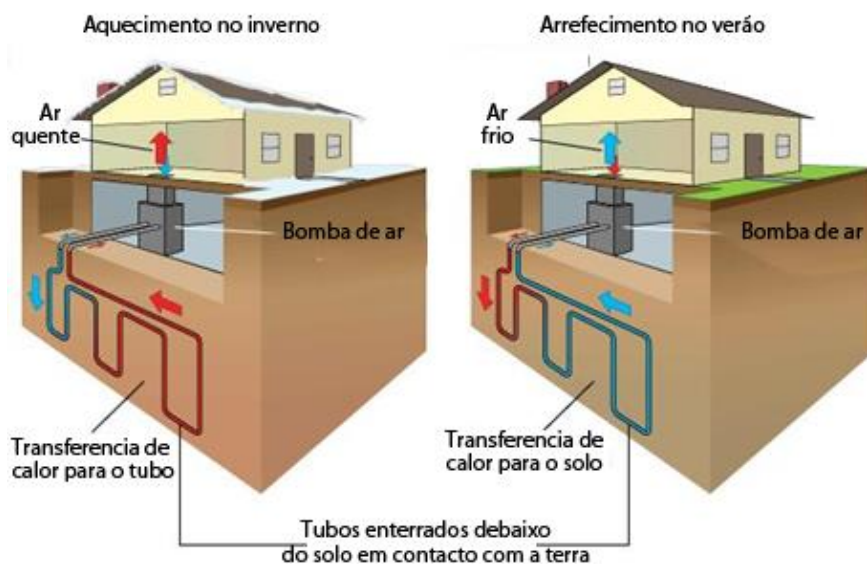


Figura 3.2 - Esquema de funcionamento de um permutador. Adaptado de Enciclopédia britânica (2012)

Estes permutadores são estruturas, normalmente constituídos em tubos metálicos, cimento ou em PVC, que estão enterrados no solo a uma profundidade superior a 0,8 m e até os 5 m, dependendo do tipo de solo, e com um comprimento variável entre os 30 m e os 70 m. À medida que o fluido condutor os atravessa, troca calor com a superfície do tubo e, por consequência, tanto pode aquecer como arrefecer conforme a estação do ano. Esta alteração de temperatura entre a entrada do permutador e a saída é aproveitada das mais diversas maneiras, podendo este estar ainda ligado a outros equipamentos auxiliares, como bombas de calor, para melhorar o seu rendimento, Bezyan *et al.*, (2015).

O conceito de arrefecimento com recurso a um permutador ar-solo pode ser dividido em três categorias. Uma delas é ser usada como arrefecimento de conforto, cuja função do permutador é unicamente arrefecer. A utilização nestes casos recai maioritariamente onde é necessária uma renovação de ar interior e ganhos térmicos reduzidos, Lopes, (2012).

Outra categoria relaciona-se com o arrefecimento de espaço. Este tipo de arrefecimento é usado para remover cargas térmicas maiores, onde existam ventiladores que forçam uma maior quantidade de ar do exterior para o interior do permutador, aumentando assim o fluxo de carga. Este tipo de sistema tem a desvantagem de incapacitar o solo ao fim de um longo período de transferências térmicas, podendo alcançar a mesma temperatura que o ar injetado nos tubos. Para tal utilizam-se os períodos noturnos, onde a temperatura é mais baixa, para fazer circular o ar no interior do permutador renovando assim a sua capacidade de arrefecimento. Por fim, existe ainda um outro tipo de utilização como arrefecimento para os permutadores sendo considerado como arrefecimento auxiliar. Tal como o nome indica, este tipo de arrefecimento colabora com outros sistemas de arrefecimento para melhorar a eficácia do sistema, tais como bombas de calor e sistemas de ar-condicionado, Lopes, (2012).

Atendendo ao referido, os permutadores invocam bastantes vantagens como a sua simplicidade, visto não ter equipamento eletrónico complicado ou outros sistemas complexos. Estes são também atrativos no que respeita aos seus custos de implementação e manutenção, pois são constituídos por materiais simples e duradouros, oferecendo também um enorme potencial de aquecimento e arrefecimento quando ligados a outros sistemas auxiliares, aumentando assim a eficácia de todo o sistema.

3.2 - Geometrias de permutadores de calor ar-solo

Tal como referido anteriormente, uma das formas de transferir energia do solo para o ambiente e vice-versa usa o sistema de permutador de solo. Este sistema pode conter, como fluido transportador de calor, água ou apenas ar, sendo que a grande diferença passa pelo diâmetro do tubo enterrado, já que nos sistemas com recurso a água este não excede, em geral, os 50 mm, enquanto nos permutadores a ar os tubos têm geralmente diâmetros maiores que 80 mm. A diferença de área de contacto deve-se ao fato das velocidades dos fluidos serem diferentes, sendo a velocidade média para uma permutador ar-solo de 2 m/s e de um líquido-solo de 0,4 m/s, e, por conseguinte, ser necessário mais ou menos área de permuta de calor. Este resultado deve-se ao facto da massa volúmica de cada fluido ser bastante diferente.

O potencial de aquecimento e arrefecimento vai diminuindo ao longo do tempo sendo mais rápido para os permutadores ar-solo. Esta diminuição deve-se ao facto de a temperatura média ser maior no permutador ar-solo do que no permutador água-solo. Desta forma, a transferência de calor média vai diminuindo com o aumento do comprimento do tubo do permutador de calor, de igual forma, a taxa de transferência vai diminuindo de igual forma com o aumento do calor do líquido que o atravessa. Contudo, mesmo com a mesma massa volúmica a ser aquecida ou arrefecida no mesmo espaço de tempo, o permutador água-solo continua a ser mais eficaz devido ao coeficiente de transferência, Gan, (2017).

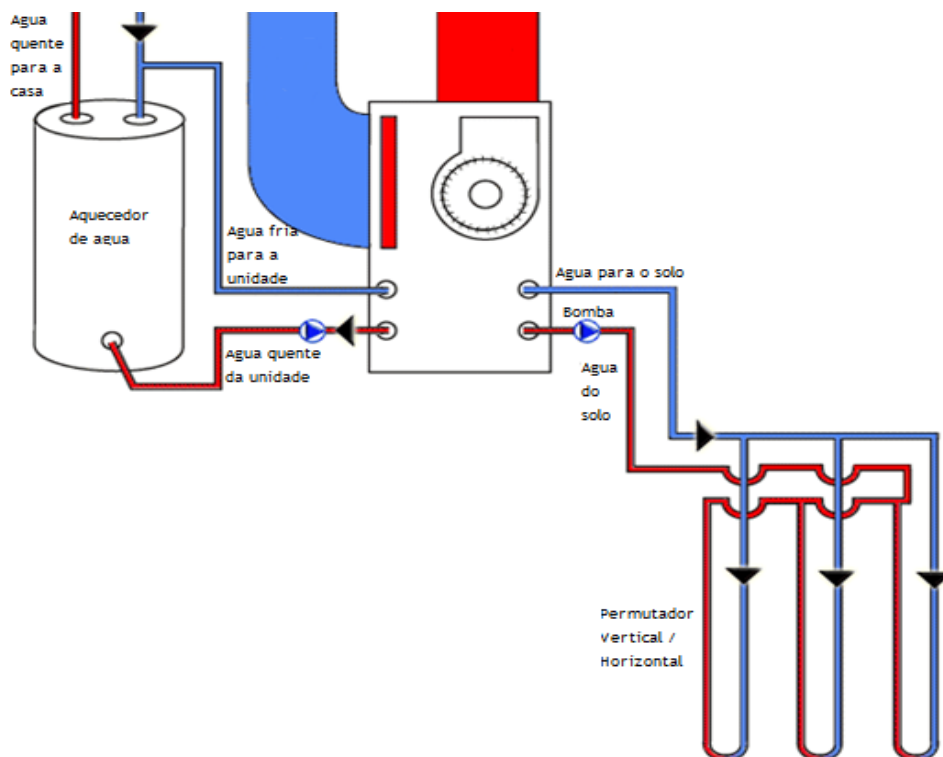


Figura 3.3 - Permutador água-solo. Adaptado de geothermalgenius.com

Para além do tipo de fluido usado no interior do permutador, existem ainda diferenças em relação à sua morfologia. Segundo, Ahmed *et al.*, (2015) podem considerar-se sistemas em circuito aberto ou sistemas em circuito fechado, como mostra a figura 3.4, em que a) corresponde a um sistema em circuito aberto e b) a um sistema em circuito fechado.

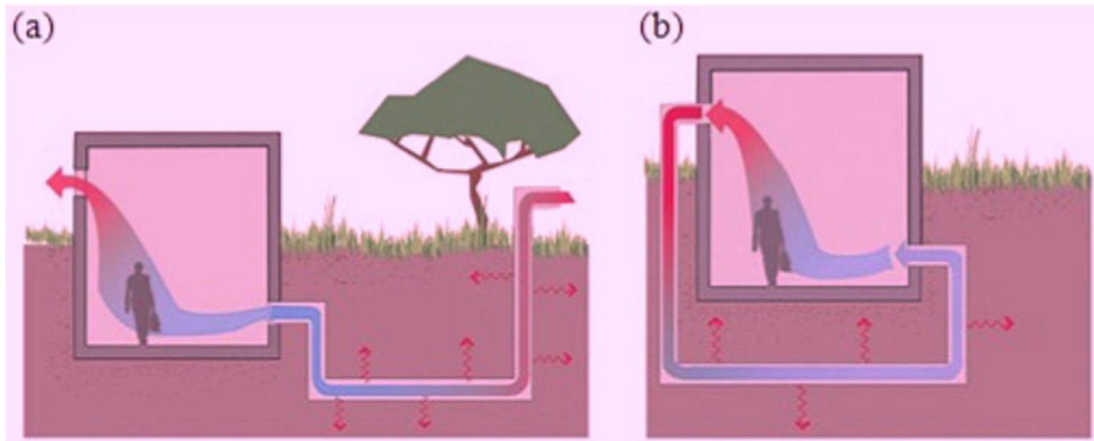


Figura 3.4 - Tipos de sistemas em circuito aberto e em circuito fechado. Manjul *et al.*, (2016)

Os permutadores ar-solo do tipo aberto operam retirando o ar do ambiente exterior e forçando-o para o seu interior, sendo posteriormente orientado para o espaço desejado. Este sistema tem a clara vantagem de renovar o ar que entra no edifício diminuindo, assim a probabilidade de criação de fungos e outros organismos prejudiciais à saúde pública, Hollmuller e Lachal, (2001). Este sistema pode ser vantajoso nas instalações cujo objetivo seja o arrefecimento, uma vez que o ar que sai no permutador é mais fresco que o ar no interior do espaço a ser arrefecido. Tal pode verificar-se em diversas situações, como o caso prático desta dissertação, em que o ar dentro do armário irá estar na maior parte do tempo a uma temperatura superior à temperatura exterior.

A configuração mais usual em habitações e outros edifícios é o sistema de permutador ar-solo fechado. Tal como o nome indica, o ar à reentrada do permutador provém do interior do espaço em processo de climatização. Neste ponto não há qualquer tipo de renovação de ar exterior sendo necessário renovar com recurso a outras soluções. Esta configuração apresenta algumas vantagens, nomeadamente a nível de desempenho, porque o ar que vai reentrar no permutador já tem uma temperatura mais próxima da desejada no interior do espaço a aquecer ou arrefecer. Outra vantagem associada a esta configuração é a ausência de humidade e condensação no interior dos tubos, Do *et al.*, (2015).

Os sistemas fechados possuem diversas configurações de modo a aproveitar o máximo de transferência de calor, dependendo muito do tipo de solo e também da incidência solar que a superfície recebe. Grande parte das instalações são feitas com os tubos na horizontal. Os rasgos

no solo são bastante fáceis de fazer durante o processo de construção de um edifício ou espaço a climatizar, minimizando assim os custos totais. Atualmente já é possível fazer os furos na horizontal reduzindo desta forma o impacto no solo e nas habitações já construídas. Quando à profundidade média esta situa-se entre os 2 m e os 3 m, dependendo do solo, contudo este sistema é mais suscetível a alterações de temperatura sazonal. As diversas configurações apresentam-se na imagem 3.5.

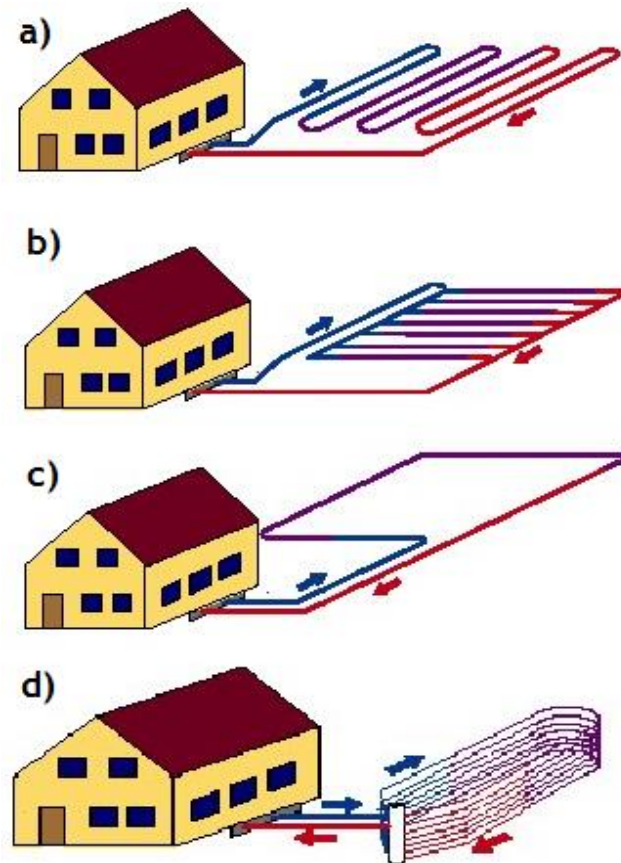


Figura 3.5 - a) serie, b) paralelo, c) trincheira, d) trincheira por patamares. Adaptado de geothermie.de

Para o caso a) e b) da figura 3.5, aplicação só é possível quando existe bastante solo disponível para se fazer o corte. Nestes casos todo solo é removido à profundidade requerida, os tubos são colocados na sua posição e o solo é repostado novamente por cima. Estes sistemas têm uma clara desvantagem em relação à aplicação c), uma vez que o solo pode saturar muito mais rapidamente, diminuindo assim o seu rendimento. Por outro lado, é possível ter o mesmo comprimento de tubo numa área menor diminuindo assim os custos para abrir o solo.

De forma a poupar a quantidade de terreno, foram aparecendo algumas técnicas novas de posicionamento dos tubos. O caso d) retrata uma dessas técnicas onde são colocados os mesmos metros de tubo, mas por camadas sendo necessário um corte mais profundo no solo. Contudo, o rendimento deste sistema não é tão elevado como nos outros exemplos referidos, sendo utilizado na sua grande maioria como equipamento auxiliar de aquecimento e arrefecimento.

Por outro lado, os sistemas verticais ocupam muito menos espaço no solo, usualmente a profundidade destes permutadores varia entre os 15 m e os 20 m. Estes sistemas aproveitam a estabilidade da temperatura a baixas profundidades, tendo assim um melhor desempenho em menos espaço útil. A figura 3.6 representa um esquema comum da aplicação de permutadores ar-solo verticais.

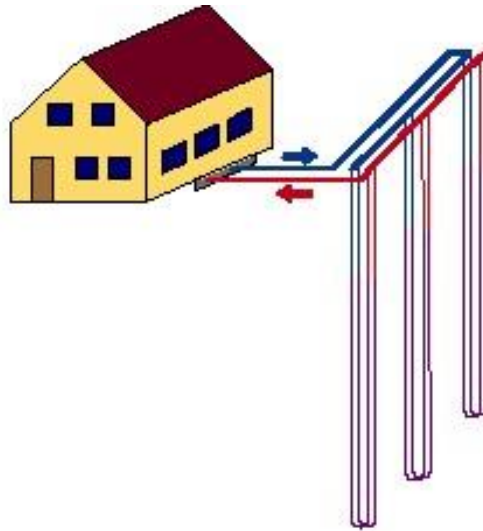


Figura 3.6 - Permutador vertical. Adaptado de geothermie.de

Os custos associados a este tipo de sistema são, na maior parte das vezes, bastante superiores devido ao tipo de instalação necessária. Para tal é necessário abrir um buraco para cada tubo, tendo de ser sempre superior a 2 vezes o diâmetro externo, devido ao facto de no fundo ser necessário uma curva de 180° para que a outra extremidade do tubo possa regressar a superfície. Todos estes tubos são ligados em paralelo de forma a fechar o circuito. Uma grande desvantagem que apresenta é a distância entre os tubos ser muito pequena obrigando a fazer um enchimento mais confinado usando, por vezes cimento, Florides, (2007).

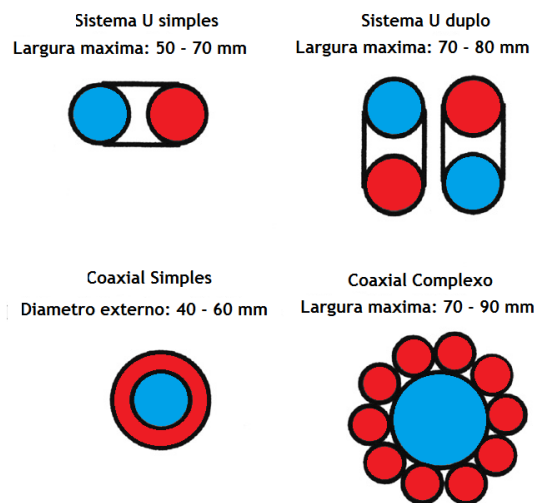


Figura 3.7 - Representação do corte de secção dos tubos no sistema vertical

A distância entre os tubos enterrados também é um fator a ter em conta. Para espaços onde haja muita área disponível, não há problema pois é difícil saturar o solo devido à proximidade dos tubos, mas quando há menos espaço é preciso ordenar a sua posição. Para tal existem várias soluções para orientar a posição dos tubos em espaços pequenos. O corte da secção dos tubos pode observar-se na Figura 3.7. Cada um deles serve o propósito para a sua aplicação sendo importante a escolha correta do mesmo. Este tipo de configuração começa a ser mais orientada para os sistemas com líquidos como condutores de calor. Esses são caracterizados por usarem tubos com menor diâmetro e assim conseguir fazer-se um furo mais fundo melhorando assim o rendimento do permutador.

Em qualquer uma destas configurações é possível ainda associar outros equipamentos, designando-se de sistemas híbridos. Estes são caracterizados pelo facto de se acoplarem a outros equipamentos para melhorar o seu rendimento final. No caso dos permutadores orientados para o arrefecimento, o ar à saída deste (por se apresentar mais fresco), irá ser utilizado como ar de entrada para o equipamento de ar-condicionado, diminuindo assim o consumo de energia elétrica e por consequência os custos monetários. Esta solução pode também ser usada em sistemas de aquecimento, podendo ser acoplados a sistemas solares, reduzindo assim o consumo. Para o caso de sistemas que sirvam para as duas vertentes, o mais comum é combinar o permutador ar-solo com uma bomba de calor, Anderson, (1998).

3.3 - Parâmetros influentes no desempenho do permutador ar-solo

3.3.1 - Parâmetros associados ao permutador

Para além da geometria, a colocação dos tubos do permutador ar-solo requer algum conhecimento, pois existem vários critérios que são fundamentais para o bom desempenho do mesmo e devem ser tidos em conta aquando a montagem. Assim sendo, a profundidade a que serão enterrados os permutadores deve ser tida em questão. Por norma, esta profundidade, está compreendida entre os 0,8 m e os 5 m, dependendo sempre do tipo de solo em causa como é referido no capítulo 3.3.2. Nesta situação é necessário avaliar a relação custo/desempenho para determinar a melhor profundidade, caso contrário o retorno do valor de aplicação irá demorar mais tempo. O gráfico presente na figura 3.8 representa a relação entre a profundidade dos tubos enterrados com a temperatura a saída dos mesmos. A apenas 1 m, a temperatura no interior do tubo aproxima-se bastante da temperatura ambiente enquanto a 4 m já se nota uma grande diferença de temperatura, sendo esta muito mais fria.

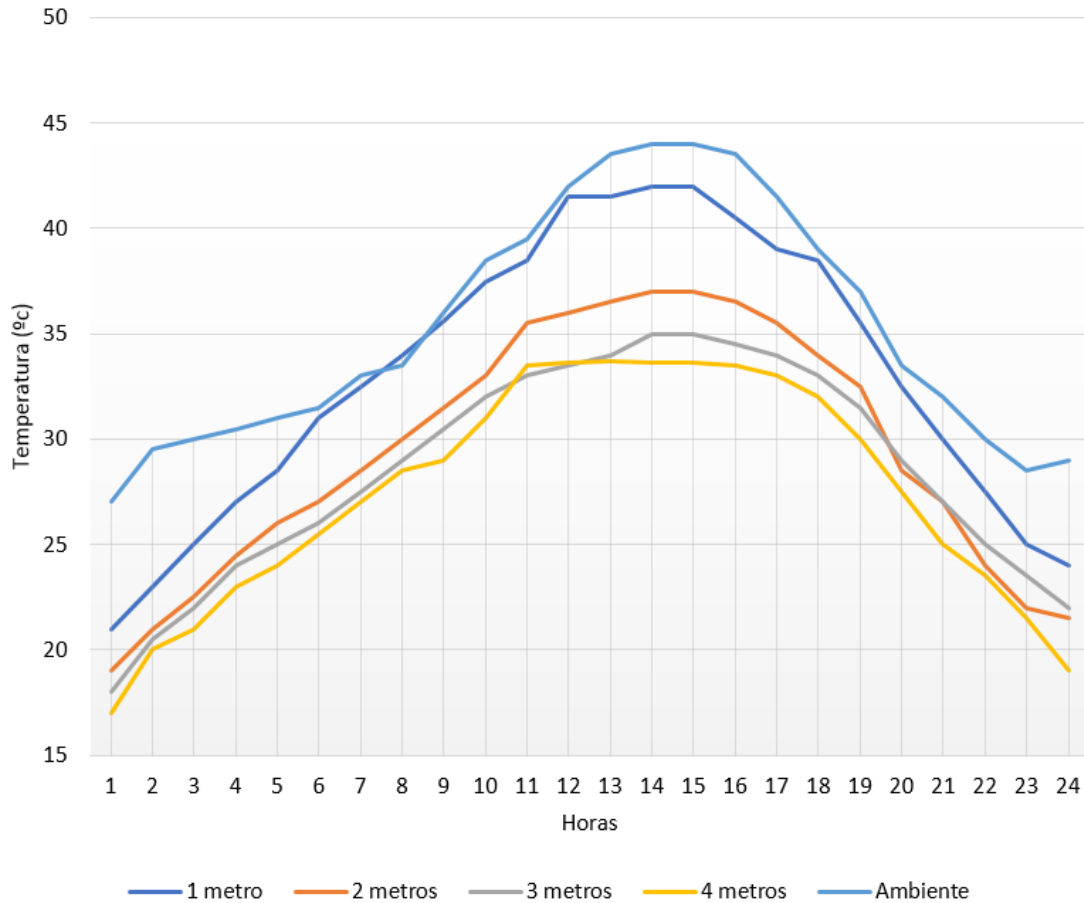


Figura 3.8 - Variação da temperatura a saída com diferentes profundidades. Adaptado de Ghosal, (2006)

Outro fator a ter em conta é o comprimento total do tubo. De uma forma geral, quanto maior este for, maior será o seu desempenho pois o tempo que o ar está em contacto com as paredes do tubo será superior. Contudo, nem todas as instalações permitem um comprimento muito elevado, seja devido às restrições de área, seja pelos custos associados. Pode ainda analisar-se o fator de perda de carga, que é originado quando o tubo tem vários obstáculos à passagem de ar, nomeadamente curvas ou estreitamentos. Bear, (1988). A figura 3.9 representa a relação entre o comprimento total do tubo e a temperatura de saída do ar do permutador. Mais uma vez é possível observar que quantos mais metros de tubo estiverem enterrados, mais tempo o ar vai estar em contacto com o solo e dessa forma aumenta a transferência térmica entre o tubo e o solo.

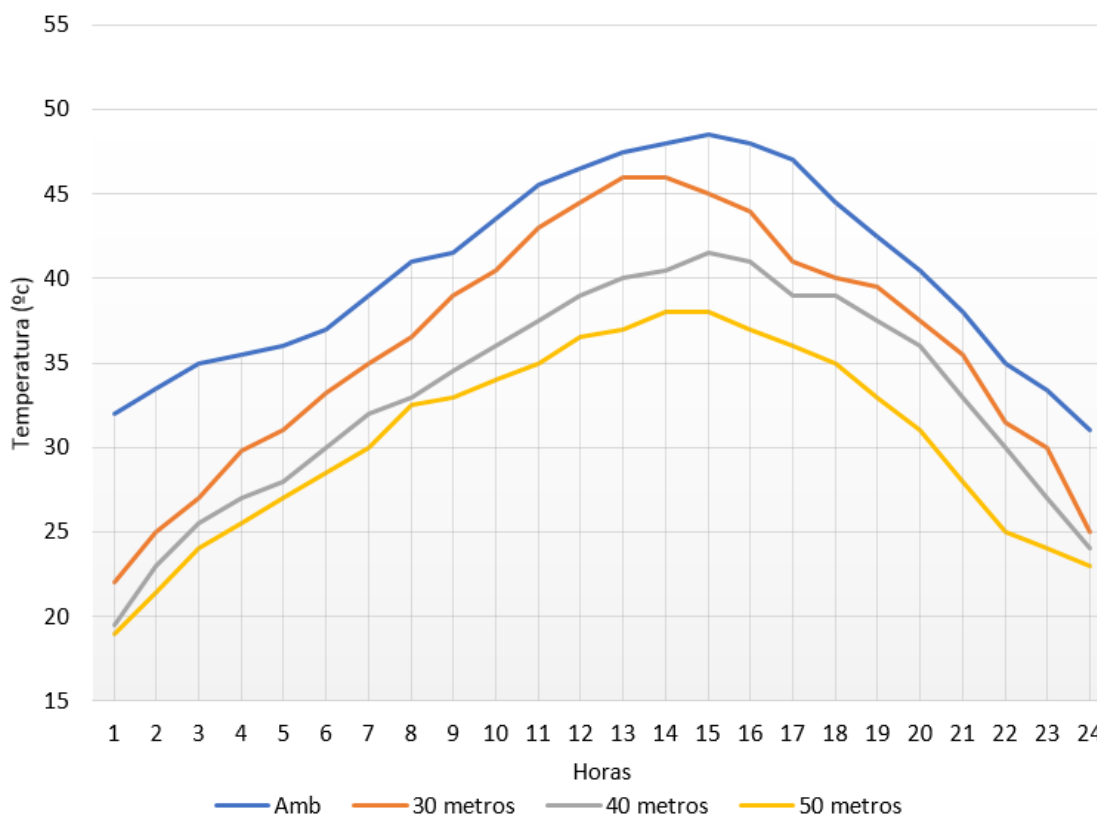


Figura 3.9 - Variação da temperatura a saída com diferentes comprimentos. Adaptado de Ghosal, (2006)

Um outro aspeto importante é o diâmetro do tubo, segundo Tiwari *et al.* (2006) este valor pode variar entre os 8 cm e os 30 cm, dependendo da sua aplicação. Para pequenas utilizações deve usar-se um diâmetro menor, porque desta forma irá haver mais ar em contacto com as paredes do tubo, melhorando assim o seu desempenho mesmo a uma velocidade mais alta. Para o caso de edifícios de grandes dimensões, o ideal é aplicar sistemas com diâmetros superiores, pois permitem a passagem de uma maior quantidade de ar. Tal como foi referido, a velocidade do ar interfere bastante no rendimento do permutador.

Segundo Lee e Strand (2007), assim que a velocidade do ar aumenta, a temperatura ao longo do tubo torna-se superior uma vez que o ar fica menos tempo dentro do mesmo e como tal tem menos tempo para transferir o seu calor para o solo. A diminuição da velocidade leva também a uma diminuição das perdas de carga, Lopes, (2012). Desta forma, aumentando o comprimento do tubo, diminuindo o diâmetro do mesmo, bem como diminuindo a velocidade do ar consegue obter-se um rendimento superior para um permutador ar-solo. Em relação à admissão do ar a ser insuflado, esta deve ocorrer a alguns metros acima do solo, devendo ser usados filtros que impeçam a entrada de poeiras ou outros detritos que se possam acumular nos tubos. Em casos extremos pode mesmo entupir o sistema aumentando os custos de manutenção. Algo evitável se for adaptando no bocal de admissão uma forma a que pequenos detritos ou até mesmo animais não entrem para o seu interior, Oliveira, (2013).

A figura 3.10 representa a comparação entre as velocidades do ar forçado para os tubos com a temperatura do mesmo a saída para o caso do período de inverno. Quanto mais lento o ar for forçado, mais tempo estará no subsolo e por consequência, neste caso, mais tempo terá para aquecer.

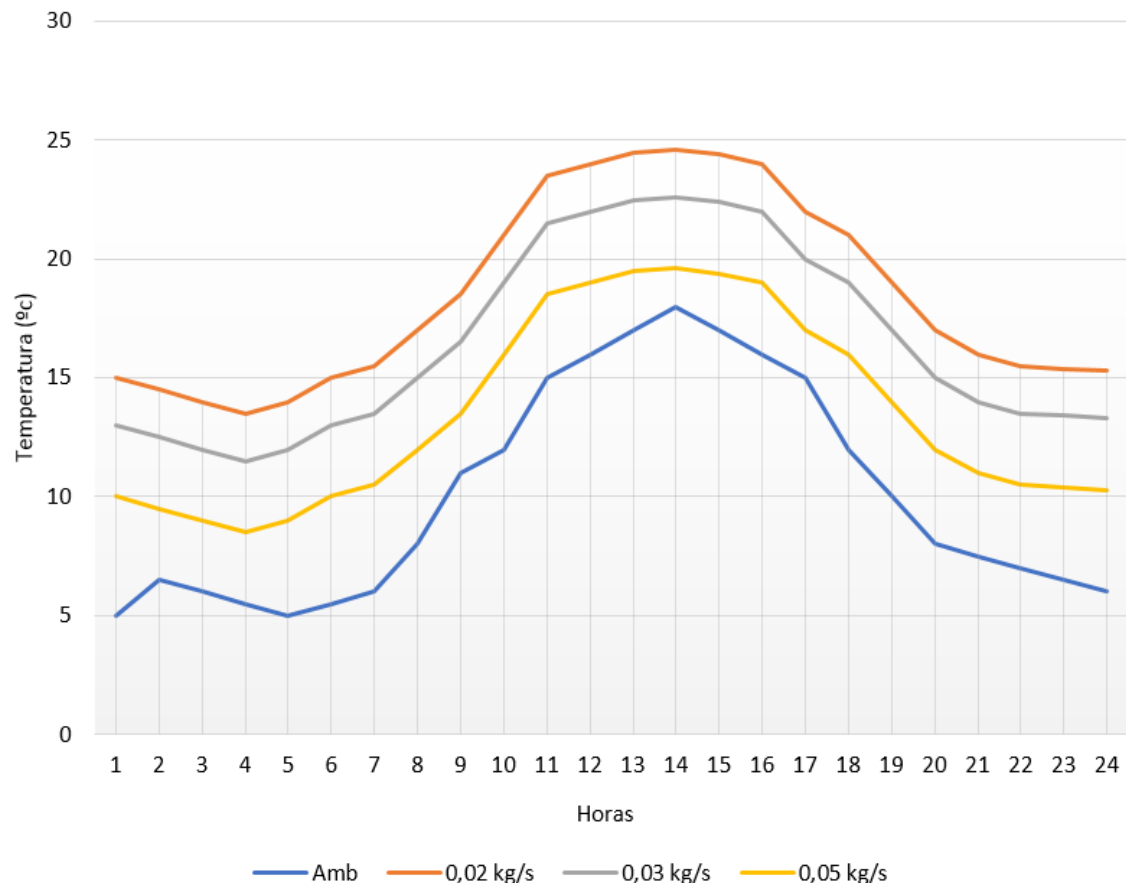


Figura 3.10 - Variação da temperatura com diferentes velocidades de ar. Adaptado de Ghosal, (2006)

A colocação dos tubos no solo deve ainda obedecer ao critério de espaçamento entre eles pois, tal como referido anteriormente, caso fiquem muito perto, o solo satura rapidamente e a sua capacidade térmica de arrefecimento é diminuída. Se forem colocados muito afastados, será necessário um maior espaço livre de solo para a sua implementação, aumentando assim os custos associados. Desta forma, a distância ideal segundo Sharan *et al.* (2002), é de aproximadamente 1,5m sendo que outros autores referem que esta distância deve ser sempre superior a duas vezes o diâmetro externo do tubo. Este valor varia sempre dependendo do espaço, número de tubos a colocar e tipo de solo do local.

Aquando a colocação dos tubos, há outros fatores a considerar nomeadamente, o tipo de material e a inclinação dos mesmos. Contudo, estes fatores são de menor relevância. O tipo de material em muito pouco influencia o desempenho do permutador. Diversos estudos foram realizados para os mais variados tipos de material, como PVC, cimento, cobre ou aço e a sua conclusão foi que mesmo com um material que tenha a maior condutibilidade térmica, não iria apresentar grandes diferenças no desempenho do permutador (Ahmed *et al.*, 2016).

Assim sendo, o material de eleição para este tipo de permutador é o PVC pois proporciona uma taxa de transferência de calor boa e tem um custo de aquisição bastante reduzido. Tem ainda a vantagem de o material ser bastante resistente e ter uma grande durabilidade física como anticorrosiva. Durante a montagem do sistema é necessário ter em atenção a sua inclinação, pois esta deve ser concebida de modo a conseguir escorrer toda a água proveniente da condensação dos tubos para um orifício e assim expelir a mesma para o solo, Oliveira e Monteiro, (2008).

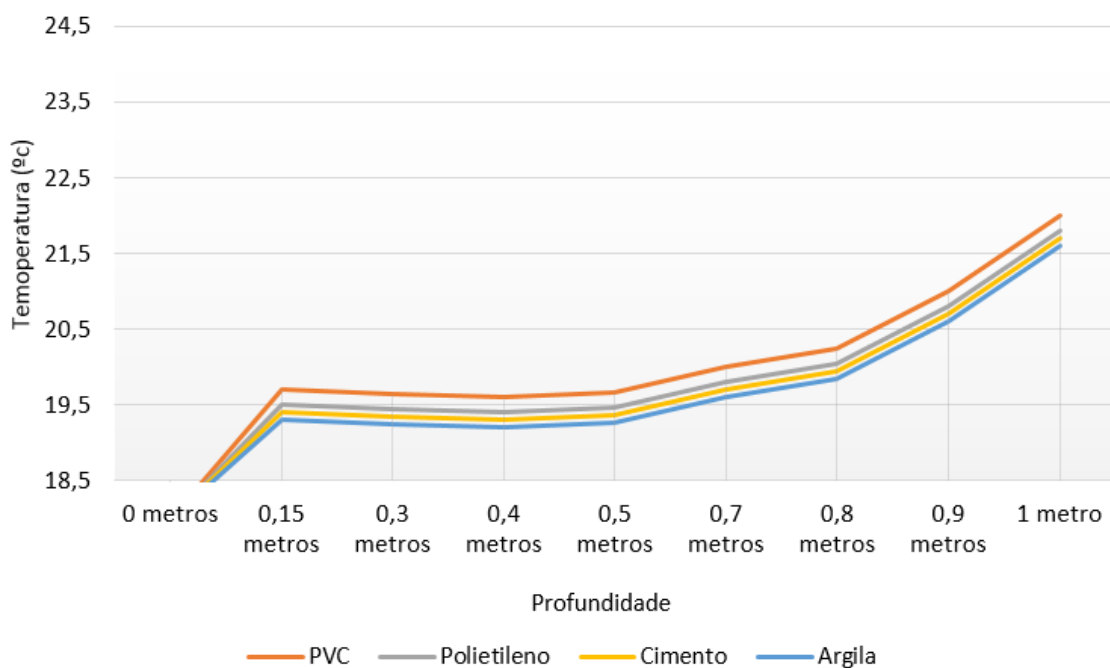


Figura 3.11 - Desempenho do permutador com diferentes materiais. Adaptado de Gan, (2017)

3.3.2 - Impacto do tipo de solo no rendimento do permutador

A litosfera é a camada mais superficial da crosta terrestre chegando até à profundidade de 60Km. Esta camada sólida é formada por rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. Esta camada do planeta Terra que contém a crosta terrestre, a camada superficial onde se encontram os mais diversos tipos de solo.

O solo é caracterizado por ser um conjunto de diversas camadas bastante finas em redor do planeta terra. Estas camadas estão divididas em quatro partes sendo a primeira parte relacionada com elementos orgânicos e ocupa apenas 5% do conjunto total. A sua constituição é a base de detritos de origem orgânica, raízes da diversa flora e de organismos presentes no solo. Esta camada tem uma profundidade média de 1 m. Seguidamente a esta fração temos a camada dos sais minerais, sendo esta a mais importante para o caso de estudo, pois encontra-se a profundidade na qual é enterrado o permutador ar-solo. Os minerais presentes nesta camada podem ser de natureza arenosa, siltosa ou argilosa. Existem ainda outros tipos de solo, mas em menos abundância. Após esta camada temos a chamada rocha mãe, sendo a mais densa e compacta, Miller, (1964).

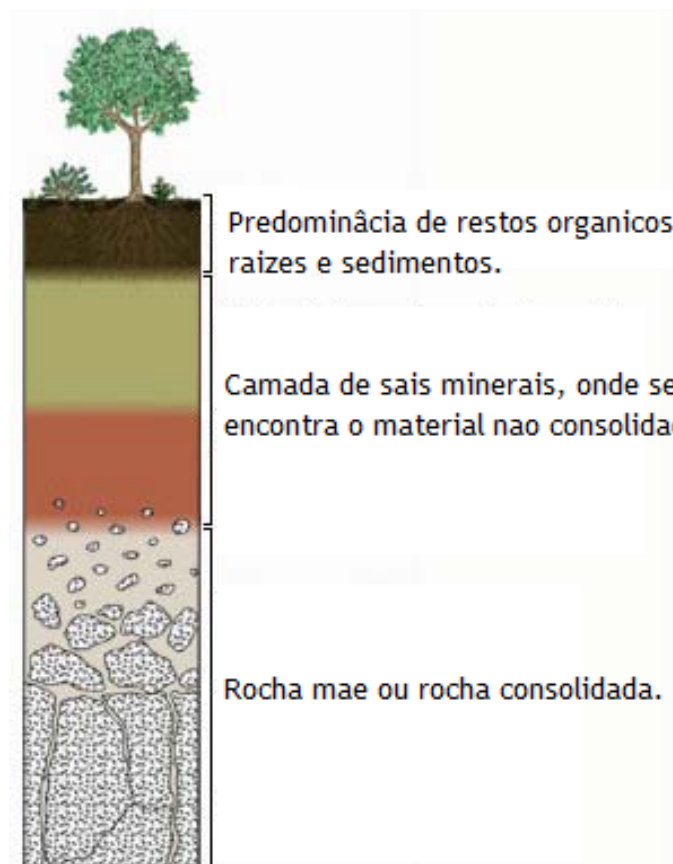


Figura 3.12 - Camadas do solo e descrição das mesmas. Universidade do Minho

O gráfico que se apresenta na figura 3.13 demonstra a constituição das duas primeiras camadas do solo. Salienta-se deste modo que metade do solo superficial é constituído por ar e água. Este valor é determinado pela porosidade do solo, ou seja, os espaços vazios entre os grãos dos minerais presentes. Quanto maior for este espaçamento, maior será a concentração de ar e água, Grotzinger, (2007). Em determinadas zonas, a concentração de água chega aos 100% tornando o solo saturado. Para o caso da matéria orgânica, como as raízes da vegetação ou até mesmo pequenos organismos a sua concentração varia entre zonas geológicas e profundidades sendo inferiores a profundidades mais altas.

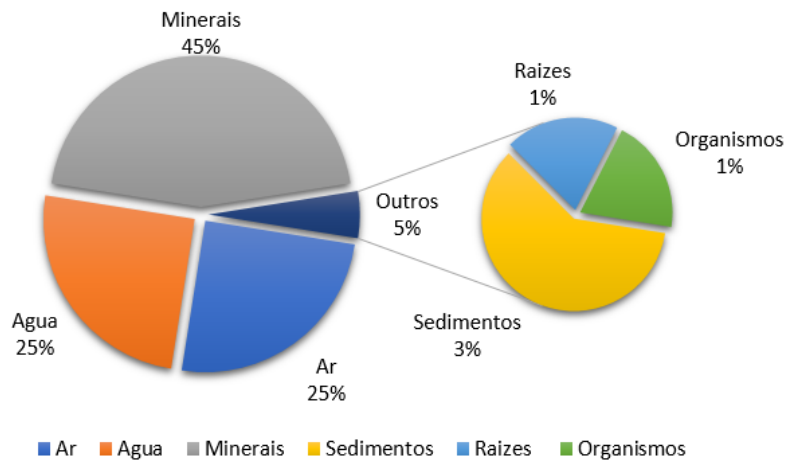


Figura 3.13 - Composição da camada superficial do solo. Adaptado de Freire, (2008)

Segundo Bansal *et al.*, (2015) o tipo de solo varia de zona para zona podendo apresentar diversas características diferentes, inclusive para a mesma localização. Estas características irão refletir o desempenho térmico do mesmo. A classificação mineral tem sido abordada mais exaustivamente por diversos autores de modo a encontrar a melhor solução para a implementação dos sistemas de permutadores ar-solo.

As características do solo que condicionam o funcionamento do permutador ar-solo são a sua massa específica (ρ), a sua condutibilidade térmica (λ) e a capacidade térmica (C). Todas estas características são essenciais na transferência de energia térmica do tubo para o solo, pois dependem do tipo de mineral presente e de alguns fatores externos, nomeadamente alterações climáticas na superfície do mesmo.

Um dos fatores que mais influencia o desempenho do solo como fonte térmica é a quantidade de água presente nos espaços livres entre os grãos dos minerais, como se pode observar na figura 3.14. Isto porque a água ocupa os poros existentes no solo, ocupados inicialmente pelo ar, e tem uma taxa de condução de calor muito superior, na ordem dos 0,6 W/m K nas condições de temperatura de 20 °C e uma atmosfera comparado com o ar que possui uma condutibilidade térmica com o valor de 0.0257 W/m K nas mesmas condições, Oliveira, (2014).

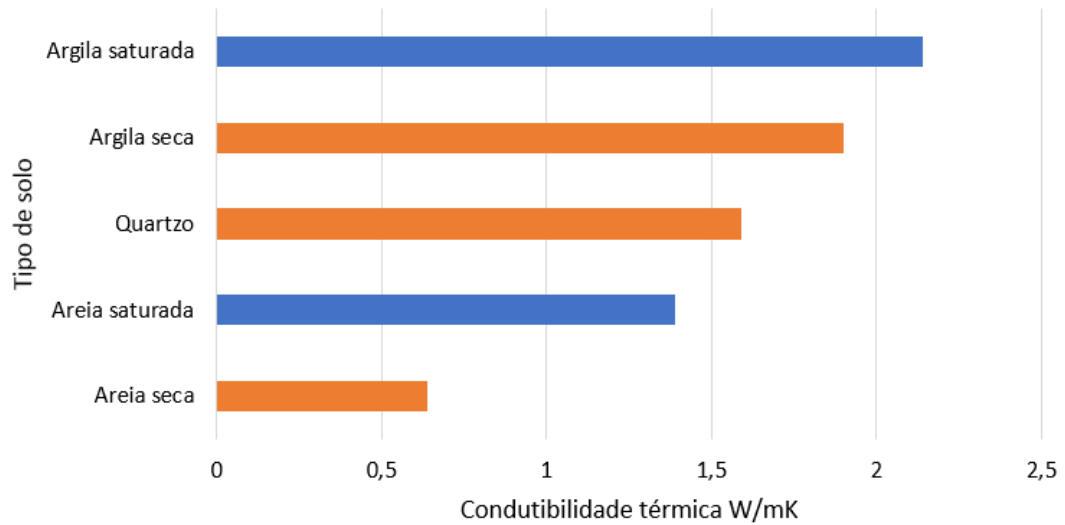


Figura 3.14 - Condutibilidade térmica de diversos materiais. Neylor e Gustin

A cobertura do solo é outro fator que altera bastante o comportamento térmico do solo. Geralmente é estudado o solo nu ou coberto com algum tipo de vegetação, como a relva, por exemplo. Esta cobertura irá influenciar a transferência do calor latente presente no solo com a superfície e meio ambiente respectivamente. Deste modo, um solo com vegetação na sua superfície terá a tendência de se manter mais fresco nos períodos de verão, sendo o seu uso mais apropriado para arrefecimento. A figura 3.15 mostra esse mesmo fenômeno, comparando o mesmo solo com e sem cobertura.

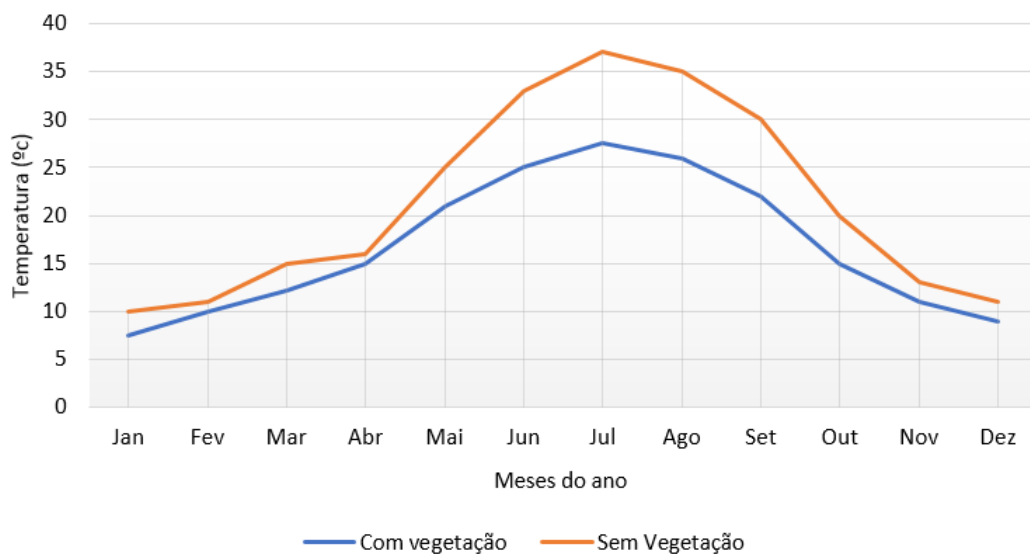


Figura 3.15 - Comparação das temperaturas num solo descoberto e coberto com vegetação. Adaptado de Cook, (1989)

A classificação física dos solos é outro dos fatores que influenciam o desempenho do solo. O solo é formado por pequenos grãos de diferentes tamanhos e a sua aglomeração é chamada de mineral. Os solos podem ser de origem argiloso, siltoso, cascalho ou arenoso e cada um destes tipos pode ser fino, médio ou grosso. O processo de análise granulométrica do material é feito através da peneiração, em que existem diversas peneiras de diferentes tamanhos montadas umas sobre as outras. Desta forma, o solo é filtrado e avaliado dependendo da quantidade de amostra que fica em cada peneira.

A forma como as partículas do solo se agrupam é completamente aleatória e está intimamente relacionada com o tamanho dos grãos, Freire, (2008). Sabendo o tipo de grão presente no solo vai ajudar na escolha da localização do permutador, pois os solos bastante compactos tendem a comportar-se termicamente como o seu mineral predominante. Por outro lado, os solos com partículas muito grandes têm a tendência a originar maiores espaços vazios entre os grãos e assim aumentar a quantidade de água no solo, aumentando a condutibilidade do mesmo, Freire, (2008).



Figura 3.16 - Peneiras usadas para separar o material retirado dos furos. Calado, (2016)

Em Portugal continental, as formações geológicas existentes estão devidamente cartografadas em cartas nacionais e devido à grande quantidade de formações rochosas existentes, estas tiveram que ser agrupadas. A classificação apresentada de seguida refere-se a FAO, ou *Food and Agriculture Organization*.

Desse modo em Portugal encontram-se os solos denominados de:

- (1) Arenossolos e Vertissolos;
- (2) Leptosolos, Fluvissolos e Regossolos;
- (3) Cambissolos;
- (4) Solonchaks;
- (5) Luvisolos.

Os solos (1) caracterizam-se pelo elevado teor em argila, que devido às características da esmectite são duros e apresentam fendas de retração quando secos e viscosos quando muito húmidos. Estes são bastante ricos a nível químico e contêm elevados teores de matéria orgânica. Já os solos (2) caracterizam-se pela pouca profundidade que apresentam (cerca de 30cm) e encontram-se assentes em rocha dura e dominam nas zonas de temperaturas amenas, elevadas e com fraca precipitação. Também os solos (3) se formam a pouca profundidade sobre uma rocha mãe. Este é o tipo de solo mais comum em Portugal nas áreas húmidas, caracterizados por não apresentar quantidades apreciáveis de argila, matéria orgânica e compostos de alumínio ou ferro. Os solos (4) encontram-se em zonas muito limitadas, principalmente em zonas de rio pois é um solo muito rico em sais. Por fim os solos (5) dominam as terras planas e mediterrâneas do sul do país e contêm uma grande concentração de argila, Ferreira, (2000).

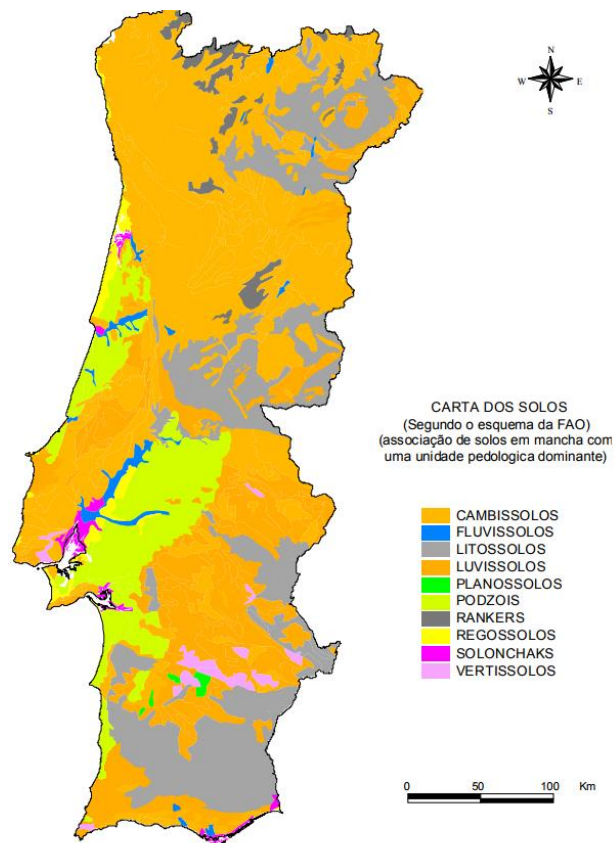


Figura 3.17 - Carta dos solos portuguesa. LNEG, (2017)

4 - Instalação experimental

4.1 - Introdução

Ao longo dos capítulos anteriores foi demonstrada a necessidade de arrefecimento dos equipamentos de telecomunicação, devido ao impacto da temperatura nos equipamentos eletrónicos. De igual modo foi também analisada a vertente do solo como fonte térmica natural, tornando-se então necessário explicar a técnica de utilizar o solo como arrefecimento auxiliar de um armário de telecomunicações, aumentando assim o seu tempo de vida útil e reduzindo custos de manutenção.

Neste capítulo serão apresentados todos os equipamentos usados nos respetivos ensaios experimentais. Irão ser expostas as características técnicas e construtivas dos aparelhos de medição, ventilação e alimentação. Da mesma forma que serão também evidenciados os aspetos mais importantes do permutador ar-solo e do armário de telecomunicações ABE_V2. O capítulo encontra-se dividido em subsecções.

4.1.1 - Melhorias efetuadas

Após iniciar o respetivo trabalho, houve a necessidade de fazer uma melhoria face a alguns equipamentos já existentes, provenientes de trabalhos realizados anteriormente. Uma destas melhorias passou pela colocação de uma proteção em redor dos diversos locais de recolha de dados, localizados na cidade da Covilhã, como mostra a figura 4.1. Nestes locais foram enterrados, com o auxílio de um penetrômetro de prospeção geotécnica e sondagem (PAGANI, TG-63/100, três tubos com cinco termopares, espaçados por 1 m entre eles perfazendo assim 5 m de profundidade no total. Estas termopares, são compostas por um fio termopar do tipo T (Omega Engineering Inc., PRT24), de forma a poder ler o valor da temperatura. Este melhoramento foi necessitado devido a vários acontecimentos ocorridos até a data, onde se chegou a verificar mesmo sondas arrancadas do solo por animais. Esta intervenção teve o intuito de prevenir mais ocorrências desfavoráveis que pudessem mesmo levar à destruição completa dos equipamentos.



Figura 4.1 - Fotografias da intervenção realizada junto a uma sonda de monitorização da temperatura. À esquerda: antes da intervenção. À direita: depois da intervenção

Outra melhoria teve como foco a preparação do espaço onde se encontra o permutador. Este local, de difícil acesso, encontrava-se completamente tapado com uma estrutura previamente construída para o efeito. Contudo, esta teria de ser eventualmente removida devido ao facto de criar sombra no solo, podendo alterar as suas características para os ensaios que iriam decorrer. Assim foram também colocadas proteções, nomeadamente manilhas de cimento, para proteger as extremidades do permutador ar-solo. A figura 4.2 a) permite observar o estado e a proteção antiga do permutador e a figura 4.2 b) representa as novas condições de segurança do mesmo. Com esta aplicação tornou-se muito mais fácil o acesso ao permutador e assim foi possível a colocação do armário de telecomunicações mesmo ao seu lado, minimizando os ganhos térmicos durante os ensaios.



Figura 4.2 - Fotografias da intervenção realizada no local do permutador de calor ar-solo. À esquerda: estado inicial. À direita: depois da intervenção

O armário de telecomunicações também sofreu ligeiras alterações no seu interior. A base, devido ao facto de estar aberta na zona inferior, iria deixar sair todo o ar proveniente do permutador. Para colmatar esta situação, foi colocada uma chapa de aço no seu interior de modo a isolar toda a zona do pedestal. Para permitir o fluxo de ar do pedestal para o interior do armário, foram também feitos 56 furos de 10 mm de diâmetro espaçados de 6 cm. O número de furos e o respetivo diâmetro foram dimensionados de forma a perfazer uma área total ligeiramente superior à área de entrada do tubo que vem do permutador. Foi também aberto um buraco no topo do armário de modo a que o fluxo de ar não fosse alterado, permitindo assim um melhor escoamento de calor do interior do armário para o exterior. As figuras 4.3 e 4.4 representam essas melhorias efetuadas no armário.

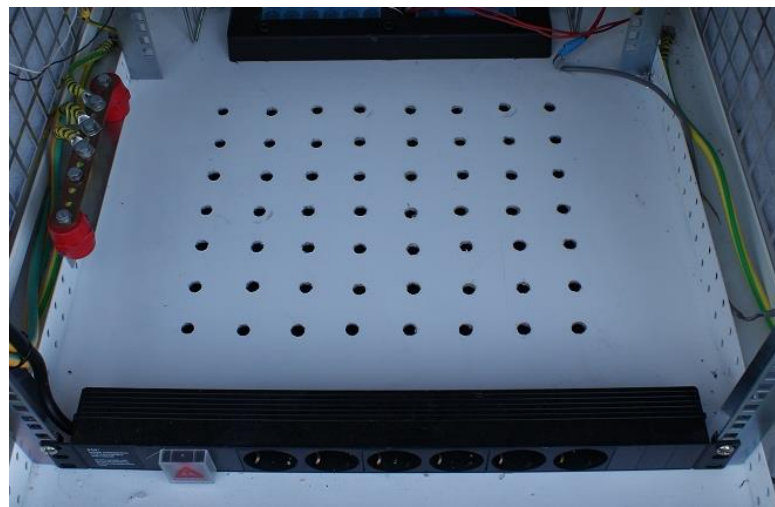


Figura 4.3 - Fotografias do interior do armário após a intervenção. Representação dos furos efetuados no painel inferior do armário de telecomunicações



Figura 4.4 - Fotografias da intervenção ocorrida no topo e na base do armário necessárias para os ensaios

4.2 - Permutador de calor ar-solo

O permutador ar-solo usado no decorrer deste trabalho foi dimensionado e elaborado por um antigo aluno da Universidade da Beira Interior, Anthony Calado, (2016). Este permutador encontra-se enterrado nas traseiras do edifício do polo das Engenharias da Universidade da Beira Interior. Este permutador está enterrado a uma profundidade máxima de 3 m, decisão apoiada pela literatura. O seu comprimento total é de 28,65 m e foi construído com o formato helicoidal retangular. Este formato não é muito comum, daí a sua escolha de forma a poder estudá-lo melhor e assim poder contribuir com novos dados para a comunidade científica. É feito de tubo PVC, fabricado de acordo com a Norma EN1327, com um diâmetro externo de 0,075 m e uma espessura de 0,0015 m. Tal como referido no capítulo 3.3.1 desta dissertação, o tipo de material pouco interfere com o desempenho do permutador. A condutibilidade térmica, característica responsável pela transferência de energia térmica entre o solo e o ar no interior do tubo, é de 0.15 W/mK.

4.3 - Armário de telecomunicações

O armário usado para os ensaios desta dissertação foi disponibilizado pela empresa VIATEL e previamente parametrizado por outro aluno da Universidade da Beira Interior, Christopher Delgado (2016). Este armário, modelo ABE_V2 pertence a classe 3.3 segundo a Norma ETSI, de 2014. Este permite operar a uma temperatura máxima de 50 °C, podendo chegar aos 55 °C por apenas breves instantes. Fisicamente é composto por um pedestal com 15 cm de altura, isolado na sua zona inferior, como foi referido anteriormente. O corpo do armário, zona onde acomoda os equipamentos, tem uma estrutura interna de forma a montar e segurar os equipamentos de telecomunicação e outros. Possui também uma parede dupla, 20 mm de espaço livre, de forma a evitar a condução direta de energia térmica do exterior para o interior. O topo do armário tem uma altura no seu centro de 120 mm e 50 mm nas extremidades para que água não se acumule e essencialmente para conduzir o ar quente expelido do seu para as ranhuras que se encontram na zona inferior lateral.

No seu interior existem outros equipamentos que permitem simular o funcionamento real do sistema e, essencialmente, compreender o fluxo de ar quente que é expelido pela resistência elétrica, ao longo do armário. Esta situação será devidamente explanada na secção 4.4.4. Assim sendo, o armário é composto por dois quadros elétricos, um para equipamentos de ar-condicionado e o outro para equipamento DC. No total, estes dois aparelhos ocupam 4U do armário. O interior contém também uma régua de 1U para pequenas ligações elétricas, a meia altura do armário. O seu sistema de ventilação original é constituído por dois ventiladores de 48 V, abordado na secção 4.4.2, que são acionados por um termostato que se encontra no topo

do armário. Foram ainda adicionados posteriormente cinco sensores de temperatura, que serão abordados com mais detalhe no ponto 5.2.



Figura 4.5 - Vista exterior do armário em estudo

4.4 - Equipamentos auxiliares

No decorrer dos ensaios, bem como na preparação dos mesmos, foram usados diversos equipamentos com as mais variadas funções. Assim, foram requeridos equipamentos de monitorização de forma a recolher todos os dados necessários ao estudo dos ensaios experimentais. De igual forma foram ainda usados sistemas de ventilação auxiliares aos já existentes, devido ao fato do permutador necessitar de ar forçado numa das suas extremidades e os ventiladores do armário não conseguirem ter fluxo de ar suficiente. De forma a alimentar a resistência elétrica no interior da caixa no armário, assim como os seus ventiladores, foi necessário seleccionar os equipamentos de alimentação de forma a que os parâmetros de funcionamento simulassem a utilização real do armário com diferentes cargas térmicas. Desta forma, os equipamentos utilizados estão descritos seguidamente.

4.4.1 - Sistemas de monitorização

De forma a obter resultados, e desse modo poder estudá-los, foi necessário recorrer a equipamentos capazes de ler e registar todos os parâmetros essenciais. No caso da presente dissertação, a temperatura e a velocidade do ar são os parâmetros a recolher. Para definir com mais exatidão o consumo instantâneo da resistência elétrica, foi também usado um medidor de energia elétrica.

Para a monitorização da temperatura, foi usado um *data logger* de temperatura com 12 canais tendo sido usado todos eles em alguns ensaios. O equipamento em questão é o modelo PCE-T 1200 da marca PCE Instruments apresentado na figura 4.6.



Figura 4.6 - Datalogger PCE-T 1200 da PCE Instruments

Os termopares utilizados nos ensaios com o permutador foram do tipo K e na recolha dos valores das temperaturas do solo, nos 3 locais, foram do tipo T. O *datalogger* permite ler também outros termopares, do tipo J, E, R e S. A grande vantagem deste aparelho é a sua versatilidade em registar os dados. Pode ser programado o intervalo entre registo de leituras e o instrumento grava automaticamente até à interrupção do utilizador, não sendo necessária a presença constante do mesmo para registar os valores. As suas características técnicas estão apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características técnicas do *datalogger*.

Número de canais	12 Canais (T1-T12)
Tipo de sensores	K / J / T / E / R / S
Exatidão	0.1 °C/1 °C ou 0.1 °F/1 °F
Intervalo de leitura	1 segundo até 3600 segundos
Suporte de dados	Cartão de memória do tipo SD
Alimentação	Bateria interna (8x1.5V)
Condições de operação	0 ° até 50 °C <85% humidade

Para poder obter os valores da velocidade do ar no interior dos tubos foi usado um anemómetro por fio quente. Este pequeno dispositivo é constituído por uma sonda onde se encontra um pequeno sensor aquecido eletricamente (fio quente) que quando exposto ao escoamento de um fluido varia a sua resistência elétrica. Isto devido ao facto de a sonda estar conectada a um circuito eletrónico, que o alimenta com uma pequena corrente elétrica e, a partir do valor da corrente que volta a entrar no circuito, é feito o cálculo da resistência. Posteriormente é então convertido para um valor de velocidade do fluido, neste caso ar (Moraes, 2003). Todos os valores presentes na dissertação foram obtidos após a média de várias leituras ao longo do mesmo ensaio, de forma a obter valores mais corretos e coerentes da velocidade do ar. Na tabela 4.2 podem-se observar as principais características do anemómetro utilizado.

Tabela 4.2 - Características técnicas do anemómetro.

Marca / Modelo	Testo 425
Parâmetros de leitura	Velocidade (m/s); Temperatura (°C/°F)
Gama de medição	0 m/s - 20 m/s; -20 °C - 70 °C; -4 °F - 158°F
Exatidão	0.03 m/s; 0.5 °C; 0.7 °F
Sonda	Sonda telescópica de velocidade e temperatura. Fio quente para velocidade e NTC para temperatura
Intervalo de medição	2 seg
Condições de funcionamento	-20 °C / +50 °C; -4 °F / +122 °F
Alimentação	1x Pilha 9V



Figura 4.7 - Anemómetro de molinete fixa. Testo 416

Como foi referido anteriormente, foi usado um medidor de potência elétrica para poder visualizar com mais precisão o valor da potência elétrica que estava a ser libertada pela resistência no interior do armário. Assim, pode comparar-se o valor da tensão calculada com o valor da tensão real aplicada. De igual modo, foi possível ao longo dos ensaios observar se todos os equipamentos associados à experiência a decorrer estavam a funcionar corretamente. Caso houvesse alguma variação na potência elétrica instantânea seria sinal que algum aparelho ter-se-ia desligado entretanto. O equipamento para medir a potência instantânea é o modelo 103281 da marca Avidsen e tem as especificações apresentadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Características técnicas do medidor de potência

Gama de potência	Máximo 3680 W / 16 A
Exatidão	1.5% Corrente / potência
Taxa de leitura	1 Segundo
Outras funções	Leitura de corrente instantânea, potencia, consumo total, preço do consumo.
Condições de funcionamento	-10 °C - +40 °C



Figura 4.8 - Medidor de potência

4.4.2 - Sistemas de ventilação

Uma das formas mais eficazes de baixar a temperatura de qualquer equipamento elétrico é através da convecção forçada de um fluido com temperatura mais baixa, seja ar ou água. Para tal, é necessário haver um dispositivo capaz de forçar o ar a uma determinada velocidade numa determinada direção. Neste sentido, foram utilizados no total seis ventiladores para os ensaios. Estão divididos em três categorias: dois ventiladores originais do armário, dois ventiladores incorporados na caixa onde se encontra a resistência elétrica e por fim dois ventiladores exteriores, usados para forçar o ar na entrada e saída do permutador.

Os ventiladores que estão presentes originalmente no armário, estão devidamente dimensionados para manter uma temperatura no interior não acima dos 55 °C. Contudo, existem equipamentos no mercado que não podem atingir esse valor, correndo o risco de diminuir a sua vida útil.

Estes ventiladores, colocados no topo do armário, no seu interior, extraem o ar quente vindo dos componentes eletrônicos e redirecionam-no para o topo do armário, acabando por sair nas ranhuras do cabeçote. Estes ventiladores são da marca EBM PAPST, modelo 4318 e permitem um caudal nominal de 170 m³/h.. Funcionam a uma tensão nominal de 48 V DC consumindo apenas 5,1 W de potência (EBM-PAPST, 2006).



Figura 4.9 - Ventiladores EBM-PAPST presentes no interior do armário

Para além destes 2 ventiladores inseridos no interior do armário, existem ainda outros 2 de menor dimensão de forma a simular os ventiladores dos equipamentos eletrônicos de telecomunicação. Estes pequenos ventiladores encontram-se na lateral da caixa onde se encontra a resistência e permitem extrair o calor gerado pela mesma do interior da caixa para o exterior. Estes 2 ventiladores permitem assim a rápida dissipação de carga térmica para o interior do armário evitando zonas muito quentes no interior da caixa. São alimentados a uma tensão de 12 Volt e têm um consumo elétrico de 1,3 W cada um segundo os dados presentes no equipamento.



Figura 4.10 - Ventiladores presentes na caixa onde se encontra a resistência

Por fim, os ventiladores auxiliares foram usados para forçar o ar exterior a entrar no permutador de calor ar-solo e desta forma aproveitar o arrefecimento do solo para arrefecer o ar que seria orientado para o interior do armário. Durante os ensaios foram utilizadas varias técnicas na colocação dos mesmos, de modo a garantir o maior fluxo de ar possível dentro do limite de 5 m/s, valor de referência na literatura.

Estes dois ventiladores, da marca S&P, modelo TD-250, permitem um fluxo de ar e um caudal suficiente para compensar as perdas de carga presentes no interior do permutador, e em diversas curvas de 90°, entre outras, conseguindo gerar um caudal volúmico de 55 m³/h ar à saída do mesmo. Estes equipamentos, apresentados na figura 4.11, são alimentados a uma tensão de 230 V consumindo uma potência elétrica de 24 W, segundo o fabricante. Sem qualquer restrição conseguem um caudal máximo de 240 m³/h, com uma velocidade fixa de 2200 rpm. Foi necessário a utilização de um adaptador nos respetivos bocais, pois o diâmetro de 100 mm do ventilador era muito grande para o de 75 mm do tubo.



Figura 4.11 - Ventiladores auxiliares da marca S&P usados com o permutador

4.4.3 - Sistemas de alimentação

De forma a que todos os sistemas elétricos tivessem energia disponível, foram usadas várias fontes de alimentação. Devido ao fato de a energia no armário não estar disponível, contrariamente ao que se passa num caso real, foi então necessário recorrer a várias fontes de energia, pois existem diversos tipos de tensões associadas a cada experiência e só desta forma foi possível atender a todas as necessidades. Assim, foi usada uma fonte de tensão para assegurar energia na resistência elétrica, uma outra fonte para alimentar os pequenos ventiladores da caixa onde se encontra a resistência e ainda uma outra fonte de tensão para fornecer energia aos ventiladores do armário, que estariam ligados a este caso estivesse operacional.

A fonte requerida para alimentar a resistência elétrica é do tipo AC/AC variável, apenas desta forma foi possível simular várias potências térmicas dissipadas pela resistência. Esta fonte está presente no Laboratório de Termodinâmica Aplicada, tendo sido construída na própria Universidade. Consegue variar a saída AC do valor 0 V até à tensão disponibilizada pela rede elétrica, 230 V. A figura 4.12 representa a fonte de tensão.



Figura 4.12 - Fonte de alimentação AC variável presente no laboratório

De forma a haver dissipação da energia térmica gerada pela resistência no interior da caixa para o exterior foram aplicados dois ventiladores. Estes ventiladores funcionam a uma tensão de 12 V e, como tal, foi necessário arranjar uma fonte de tensão, figura 4.13, para os mesmos. A escolha recaiu sobre uma fonte alimentação de um computador compacto com diversas tensões de saída, tendo apenas sido aproveitado a saída de 12 V.



Figura 4.13 - Fonte de alimentação DC de valor fixo

Tal como já referido anteriormente, o armário não tinha sistema de distribuição de energia e, por esse motivo, os seus ventiladores não recebiam qualquer energia por parte do mesmo. Para tal foi necessário adquirir uma fonte de tensão AC/DC de 48 V, tensão nominal à qual quase todos os equipamentos dentro do armário funcionam. Esta fonte de tensão, figura 4.14, possui uma corrente máxima de saída de 0,5 A resultando em 24 W de potência. O consumo total destes ventiladores é de apenas 10 W.



Figura 4.14 - Adaptador AC/DC 48 V para os ventiladores do armário

4.4.4 - Sistemas de aquecimento

De forma a simular o funcionamento real do armário foi desenvolvida uma caixa metálica com uma resistência elétrica no seu interior. O objetivo é alimentar a resistência de forma a gerar energia térmica sob a forma de calor. A caixa tem o tamanho de um equipamento de telecomunicações comum destes sistemas, com uma largura de 415 mm, 310 mm de profundidade e 90 mm de altura, representando um tamanho de 2U na unidade decretada na Norma EIA-310. Esta é completamente fechada, à exceção da zona posterior, que possui furos de forma a dissipar todo o calor libertado, bem como duas aberturas na face lateral onde se encontram os dois ventiladores, como referido no ponto 4.4.2. Esta caixa é feita de aço com 2 mm de espessura e a resistência encontra-se a meia distância da profundidade total. Na figura 4.15 apresenta-se a resistência elétrica presente no interior da caixa metálica.

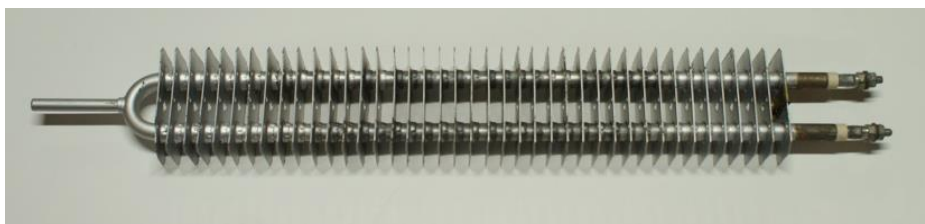


Figura 4.15 - Resistência elétrica de 50 Ω presente no interior da caixa metálica

5 - Estudo experimental

Nesta secção serão apresentados e caracterizados todos os estudos experimentais feitos no decorrer desta dissertação. Assim, foram realizados dois estudos em paralelo. Um destes estudos consistiu na continuação de um trabalho anteriormente iniciado, Calado 2016, cujo propósito era analisar a evolução da temperatura do solo em três zonas distintas na cidade da Covilhã. O outro estudo consistiu no arrefecimento de um armário de telecomunicações com recurso a um permutador ar-solo, analisando o seu desempenho global.

5.1 - Monotorização da temperatura do solo

Ao longo do ano foram efetuadas múltiplas leituras térmicas, em três localizações diferentes, a diversas profundidades. Este tipo de ensaio permitiu analisar o perfil da temperatura nos três locais ao longo do ano. Os registos destes valores foram efetuados desde o dia 10 de outubro de 2016 até 2 de outubro de 2017, todas as segundas-feiras, salvo raras exceções em que eram feitas no dia seguinte. Desta forma, foi possível obter um maior número de dados e como tal, uma melhor perceção do perfil da temperatura dos diferentes locais ao longo de todo o ano.

Os locais escolhidos para estas leituras foram determinados devido ao seu tipo de solo, permitindo assim obter uma maior gama de valores, de modo a ter uma melhor comparação entre o tipo de solo. Calado, (2016). De forma a realizar as leituras a diversas profundidades, foram colocados termopares espaçados entre si 1 m, até perfazer os 5 m de profundidade, perfazendo um total de 15 termopares. A recolha de dados dos valores das sondas e da temperatura ambiente foi realizada com recurso ao *datalogger* descrito na secção 4.4.1.

A figura 5.1 apresenta o local onde se encontra uma das sondas, localizada a poucos metros do edifício das engenharias, perto do departamento de Engenharia Civil da Universidade da Beira Interior, identificada por 1-“Engenharias”. Na figura 5.2 podemos observar o local onde se encontram as duas restantes sondas, localizadas na zona da reitoria da Universidade da Beira Interior identificadas por 2-“Reitoria_Baixo” e 3-“Reitoria_Cima”.



Figura 5.1 - Localização do ponto de leitura 1 no polo das engenharias da UBI



Figura 5.2 - Localização dos locais de leitura 2 e 3 na reitoria da UBI

As sondas foram montadas num tubo de PVC com 5,25 m de comprimento, protegendo assim o fio termopar de possíveis adversidades do solo. A cada metro foi feito um furo de modo a passar a “junção quente” de cada termopar para o exterior do tubo, apoiado com uma guia, de modo estar em contacto direto com o solo. O fio termopar usado nas sondas é do tipo T (Omega Engineering Inc., PRT24) com uma gama de leituras entre os $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $370\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na implementação de cada sonda foram recolhidas amostras do solo, de forma a estudar a sua composição e granulometria. Deste modo foi possível comparar as características térmicas de cada zona.

5.2 - Ensaio com o permutador ar-solo e o armário

Com o objetivo de verificar a melhoria do sistema de arrefecimento através de um permutador ar-solo e sem aumentar em demasia o consumo energético do sistema, foram testados vários cenários diferentes de arrefecimento. Deste modo foi possível analisar e comparar os diversos resultados, que se apresentam na secção 5.3. Os vários ensaios experimentais foram realizados no período compreendido entre o dia 10 de julho e o dia 17 de agosto de 2017. Este período foi escolhido de forma a aproveitar o máximo de radiação solar incidente bem como a maior temperatura ambiente possível.

De forma a simular o funcionamento normal de um armário de telecomunicações, foi colocado no exterior da Faculdade de Engenharias da Universidade da Beira Interior, um armário orientado a sul sem qualquer obstrução solar durante o período diurno. Desta forma, o armário ficou exposto a toda a radiação solar durante o período referido anteriormente. Para além da sua colocação no exterior, foi também introduzida uma resistência no seu interior, (referenciada na secção 4.4.4), capaz de gerar uma potência térmica dissipada suficientemente alta para simular o funcionamento dos equipamentos no interior do armário, na sua capacidade máxima, na ordem dos 450 W.

Assim, foi então necessário recorrer a técnicas de arrefecimento para dissipar tal energia térmica. De forma a realizar um estudo mais completo realizaram-se três tipos de ensaios diferentes, para estudar a dissipação no armário e desta forma comparar a eficiência de cada sistema. No primeiro tipo de ensaio foram usados apenas os ventiladores originais do armário, sendo esta a configuração original do sistema. No segundo ensaio, para além dos ventiladores originais do armário, foram colocados adicionalmente dois ventiladores externos ligados ao permutador ar-solo. Por fim, no último ensaio foram usados os ventiladores do armário e um ventilador exterior que garantisse o mesmo caudal do ensaio em que se usou o permutador de calor.

No local onde decorreu o ensaio, encontrava-se também uma caixa metálica com o objetivo de acomodar todos os instrumentos de medição e alimentação necessários. A caixa foi colocada no lado norte em relação ao armário, para evitar a radiação solar na mesma de forma a que pudesse gerar sombra, nas horas mais quentes do dia, aos equipamentos mais sensíveis no seu interior. A entrada e respetiva saída de ar do permutador também se encontravam no lado norte do armário. Esta solução permitiu evitar maiores ganhos de calor entre o permutador e o armário, como será explicado mais à frente.

A figura 5.3 apresenta a montagem de todos os equipamentos utilizados, onde se pode ver: (1) o armário; (2) a caixa metálica, com os equipamentos de medição no interior; (3) os dois ventiladores, estando um na entrada no permutador e um na entrada do armário interligados; (4) o termopar, para a medição da temperatura ambiente e (5) o medidor de potência elétrica, para controlar a energia fornecida à resistência elétrica.



Figura 5.3 - Localização dos componentes de apoio ao ensaio

Os ensaios realizados seguiam, regra geral, o mesmo procedimento. Todos os ensaios tiveram início no período da manhã, entre as 9h e as 9h30, de forma a absorver o máximo de radiação possível e simular de forma fidedigna o funcionamento do sistema. Numa primeira fase, eram ligados todos os termopares, requeridos ao respetivo ensaio, ao *datalogger*, assim como a resistência elétrica à fonte de alimentação. Após definir o valor de potência consumida pela resistência, com recurso ao equipamento medidor de potência, eram então ligados todos os outros equipamentos. Os ventiladores da caixa onde se encontra a resistência e os ventiladores, respetivos a cada ensaio.

A duração de cada ensaio era de aproximadamente 8 horas. Após esse período de tempo o edifício onde está localizado o CFIUTE (Centro de Formação Interação UBI Tecido Empresarial) gerava sombra no local de ensaio e a temperatura ambiente descia para valores demasiado baixos. O *datalogger* foi programado para registar os valores dos diversos termopares a cada 10 minutos, dando uma boa perceção evolução da temperatura ao longo do dia.

No total foram instalados e usados doze termopares distribuídos pelo armário, tubo de ligação, entre o armário e ventilador, bem como no interior do permutador ar-sole. No armário foram colocados cinco termopares. O primeiro foi inserido no topo, de forma a monitorizar a temperatura de ar que os ventiladores embutidos no armário dispersavam. Os restantes quatro termopares foram colocados na zona de montagem dos equipamentos. Deste modo foi possível analisar a evolução da temperatura ao longo do armário.

Assim, o termopar 2 foi colocado na zona inferior destes ventiladores, ou seja, no topo da zona útil de montagem de equipamentos. O termopar 3 foi colocado poucos centímetros acima da caixa onde se encontrava a resistência elétrica. Os termopares 4 e 5 foram colocados na zona inferior da caixa, estando o termopar 4 mais próximo da mesma e o termopar 5 muito próximo dos furos presentes no fundo do armário. Este último termopar foi colocado essencialmente para comparar a temperatura de entrada de ar no armário, com a temperatura de ar à saída do permutador e assim perceber os ganhos térmicos existentes no transporte do ar. A posição dos termopares referidos encontra-se visível na figura 5.4.

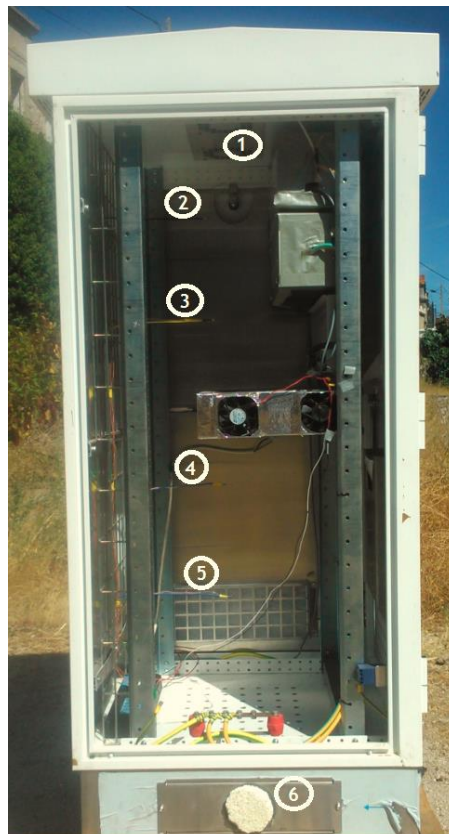


Figura 5.4 - Localização dos 6 termopares presentes no armário

Todos os termopares referidos anteriormente foram colocados posteriormente para poder executar os ensaios com o armário. O termopar 6 foi colocado na saída do ventilador após o permutador, com uma função similar ao termopar 5. Os termopares presentes no permutador, 5 no total, já tinham sido colocados no âmbito do trabalho de Calado, 2016. As localizações destes termopares serviram para analisar variação da temperatura do ar desde a entrada até à saída do mesmo. Desta forma o primeiro termopar (A) encontra-se a 3,20 m da entrada, o segundo (B) a 5,53 m do anterior, o terceiro (C) a 5,53 m do anterior, o quarto (D) a 4,98 m do anterior e o ultimo (E) a 5,53 m do anterior (Calado, 2016).

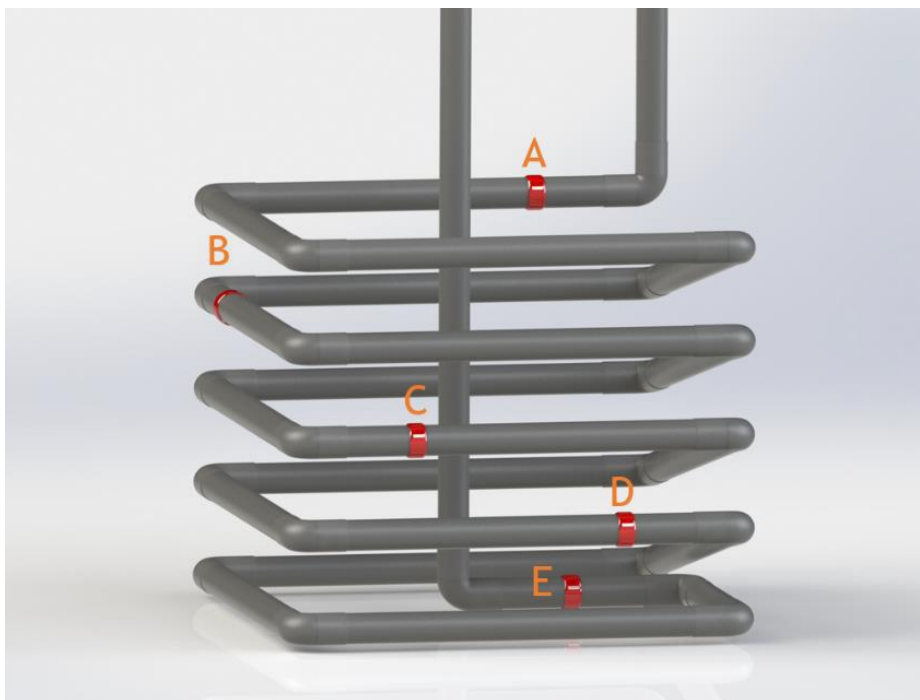


Figura 5.5 - Localização dos termopares ao longo do permutador. Calado, (2016)

Por fim, o ultimo termopar a ser utilizado foi para medir a temperatura ambiente. Este foi colocado na zona frontal do armário de modo a estar exposto a radiação solar o durante o tempo todo do ensaio.

De forma a obter o maior numero de resultados e com isso perceber o desempenho dos sistemas de arrefecimento a testar, foi medido a velocidade de ar gerado pelos ventiladores já existentes no armário assim como com a utilização dos ventiladores externos auxiliares. Para isso recorreu-se ao anemómetro referido no ponto 4.4.1. Para primeiro ensaio de leituras foi fechado o orifício no fundo do armário e também isolado as ranhuras no topo do mesmo. O ar era então forçado a entrar pelas entradas laterais e a sair no orifício feito no topo. O provete do anemómetro foi colocado mesmo no centro e dessa forma foi possível retirar o valor da velocidade. Para testar a velocidade com os ventiladores externos auxiliares, o sistema com o permutador foi todo ligado e o ar proveniente do mesmo entrava no orifício no fundo do armário. A posição do anemómetro foi exatamente igual ao anterior. Após a leitura dos valores da velocidade procedeu-se do caudal mássico, utilizando-se a expressão 5.1.

$$\dot{m} = U_{med} * Area * \rho_{ar} \text{ [Kg/s]} \quad (5.1)$$

Com U_{med} a velocidade media registada em cima e $Area$, a área de secção do orifício. A potência de arrefecimento foi calculada através da expressão seguinte.

$$Q_F = \dot{m} * Cp_{ar} * (T_{in} - T_{out}) \text{ [W]} \quad (5.2)$$

Em que:

U_{med} : é a velocidade media. [m/s]

$Area$: área de secção do orifício. [m]

ρ_{ar} : Densidade do ar a 30 °C. [Kg/m³]

Cp_{ar} : Calor específico do ar. [Kj/Kg.k]

T_{in}, T_{out} : Temperatura de entrada e saída respetivamente. [°K]

5.2.1 - Ensaio com ventilação forçada de ar exterior usando apenas os ventiladores do armário

Este tipo de ensaio foi realizado com o objetivo de descobrir até que ponto os ventiladores incorporados no armário eram capazes de extrair a carga térmica, causada pela resistência elétrica, no interior do mesmo. O seu dimensionamento foi executado de modo a que seja possível extrair o calor gerado pelos equipamentos, sem que estes atinjam os 55 °C. Desta forma, este tipo de ensaios decorreu sem qualquer equipamento auxiliar para renovar o ar no interior do armário.

Neste seguimento, foram efetuados dois ensaios com diferentes cargas térmicas para determinar os limites de arrefecimento dos ventiladores. O primeiro foi a 75% da carga máxima e o segundo foi com a carga máxima. O primeiro ensaio, realizado com uma carga inferior, tem sobretudo o objetivo de aferir a segurança em realizar um ensaio com a carga máxima, a uma temperatura ambiente elevada. Atendendo a que o resultado obtido foi positivo, avançou-se para o segundo ensaio. Estes ensaios decorreram em dias com uma temperatura ambiente similar permitindo assim a comparação entre os dados. Para a sua realização, foram obstruídos os dois furos feitos previamente, um no pedestal e o outro no topo. Deste modo manteve-se o fluxo de ar original conseguido pelos ventiladores para a extração de ar quente.

A figura 5.6 representa esse mesmo esquema. O ar exterior é forçado através das ranhuras inferiores do armário e ao entrar e contacto com a caixa presente no interior, esta transfere a sua carga térmica para o ar, aquecendo-o. O ar quente é então expelido pelas ranhuras presentes no topo.



Figura 5.6 - Esquema da ventilação do armário com os ventiladores embutidos

5.2.2 - Ensaio com ventilação forçada de ar exterior e ar proveniente do permutador ar-solo

O procedimento do ensaio iniciou-se com ligação de todos os termopares ao *datalogger* e assim que os valores fossem coerentes, a resistência elétrica seria ligada à potência desejada. Desta forma, assim que a temperatura no interior do armário alcança-se os 55 °C, os ventiladores eram acionados.

Na entrada do permutador foi colocado um ventilador, para forçar o ar ambiente para o seu interior, já na outra extremidade do permutador foi colocado um tubo com aproximadamente 1 m, para fazer a união com outro ventilador colocado à entrada inferior do armário. Este tubo era revestido a lã de vidro com uma película refletora em toda a sua volta, de modo a refletir o máximo da radiação solar incidente no mesmo e evitar ganhos de temperatura do ar proveniente do permutador. O ar que entrava no interior do armário proveniente do permutador vinha, mais fresco que a temperatura ambiente registada, permitindo assim entrar uma temperatura no interior do armário mais baixa. A figura 5.7 representa o esquema de montagem deste mesmo ensaio.



Figura 5.7 - Esquema de montagem do ensaio com o permutador de calor ar-solo

5.2.3 - Ensaio com ventilação forçada de ar exterior usando os ventiladores do armário e um ventilador auxiliar

O propósito da realização deste ensaio foi determinar se o arrefecimento do armário era influenciado apenas pelo aumento do caudal de ar na zona inferior do mesmo, ou se era realmente devido à utilização do permutador ar-solo. De forma a analisar o pressuposto, os ensaios relativos a este esquema foram realizados com os ventiladores do armário originais e um ventilador externo, igual ao mencionado no capítulo anterior. A velocidade foi medida junto ao termopar número 6 (na zona inferior e exterior do armário), com os dois ventiladores e o permutador interligados. Esse valor foi usado para simular a mesma montagem, mas apenas com um ventilador externo. Desta forma, o ar entrava no armário à temperatura ambiente e com um caudal semelhante ao obtido com a utilização do permutador ar-solo.

O ventilador usado para fornecer caudal de ar para o interior do armário, foi montado exatamente no mesmo local do ensaio mencionado no subcapítulo anterior, com a diferença de ter sido restringido o seu bocal de admissão com recurso a fita isoladora. A potência elétrica transmitida à resistência elétrica foi elevada o suficiente para simular o funcionamento dos equipamentos na carga máxima, como nos restantes ensaios.

5.3 - Discussão de resultados

O presente subcapítulo visa a expor os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados. Numa primeira abordagem serão apresentados os valores referentes às leituras semanais da temperatura do solo, e, posteriormente, a sua análise comparativa. A segunda parte será dedicada à análise dos resultados obtidos nos ensaios com o armário de telecomunicações. Neste subcapítulo, será também analisada a forma como a utilização do permutador ar-solo, para arrefecimento, se torna uma mais-valia para a diminuição da temperatura no interior do armário de telecomunicações, assim como para a redução dos consumos energéticos, face aos sistemas tradicionais de arrefecimento.

5.3.1 - Monitorização da temperatura

De forma a compreender a evolução da temperatura no solo ao longo do ano, foi realizada uma leitura semanal em cada um dos três locais previamente definidos. Deste modo, foram realizados três gráficos, um por cada localização. Cada um destes contém seis séries de dados que correspondem à temperatura ambiente, à temperatura a 1 m de profundidade assim como aos valores da temperatura a 2 m, 3 m, 4 m e 5 m, respetivamente.

5.3.1.1 - Local 1 - Engenharias

Tal como referido anteriormente, um dos locais de leitura é o 1- “Engenharias”. No gráfico da figura 5.9 podem observar-se as leituras aí efetuadas, analisando-se claramente duas zonas distintas, uma delas onde a temperatura ambiente (azul tracejado) é mais alta que os restantes valores, e outro onde esta é relativamente mais baixa que as restantes. Entre esses períodos nota-se uma transição em que a temperatura ambiente segue num sentido e as restantes em sentido contrário. Ao longo de todo o ano as temperaturas nas diversas profundidades acompanham as oscilações da temperatura ambiente, com um ritmo menos gradual com o aumento da profundidade. Este facto é explicado pela inércia térmica do solo que aumenta com a profundidade (Bansal e Mathur (2009)).

Analisando com mais detalhe as temperaturas da figura 5.8, pode constatar-se que entre os 4 m e os 5 m a diferença ao longo de todo o ano é muito ténue. Desta forma, é mais favorável a exploração a apenas 4 m de profundidade. A profundidade da 1 m é vantajosa apenas nos períodos de verão, onde se consegue manter uma temperatura bastante mais baixa que a ambiente. Já nos períodos de inverno o seu comportamento é bastante semelhante à temperatura ambiente, não sendo por isso favorável à sua utilização.

A profundidade ideal de exploração deste local situa-se a partir dos 4 m, inclusive, de profundidade, pois em termos de gradiente de temperatura ao longo do ano é o que apresenta a melhor escolha.

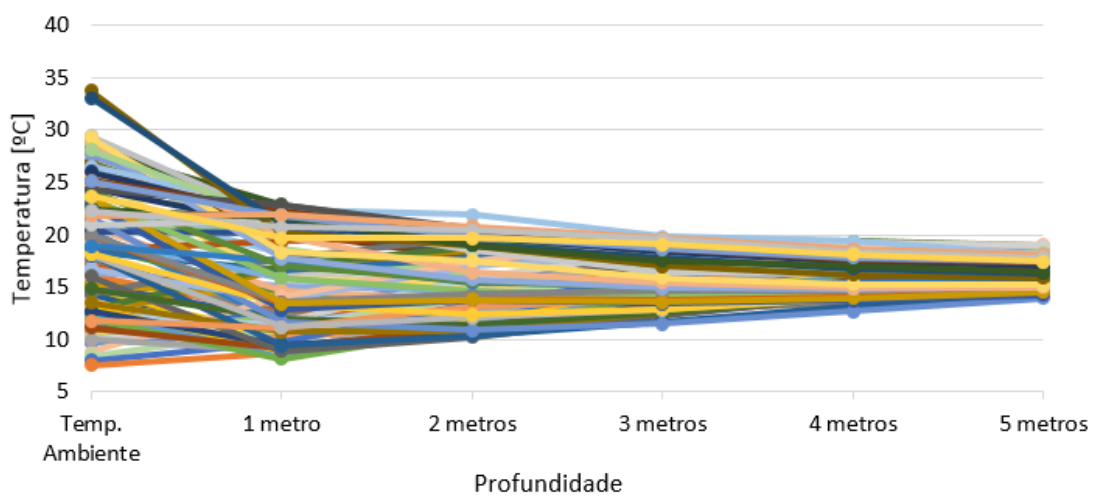


Figura 5.8 - Valores da temperatura medidas ao longo da profundidade no local 1

O gráfico representado na figura 5.8 representa as diversas leituras efetuadas. Através destes dados é possível observar a tendência da temperatura em homogeneizar-se com o aumento da profundidade. Cada linha representa uma leitura efetuada no local 1. Com o aumento da profundidade é possível observar a menor dispersão de valores. É de notar a pouca diferença entre os 4 m e 5 m de profundidade. A diferença da temperatura média entre estes 2 pontos é de apenas 0,45 °C.

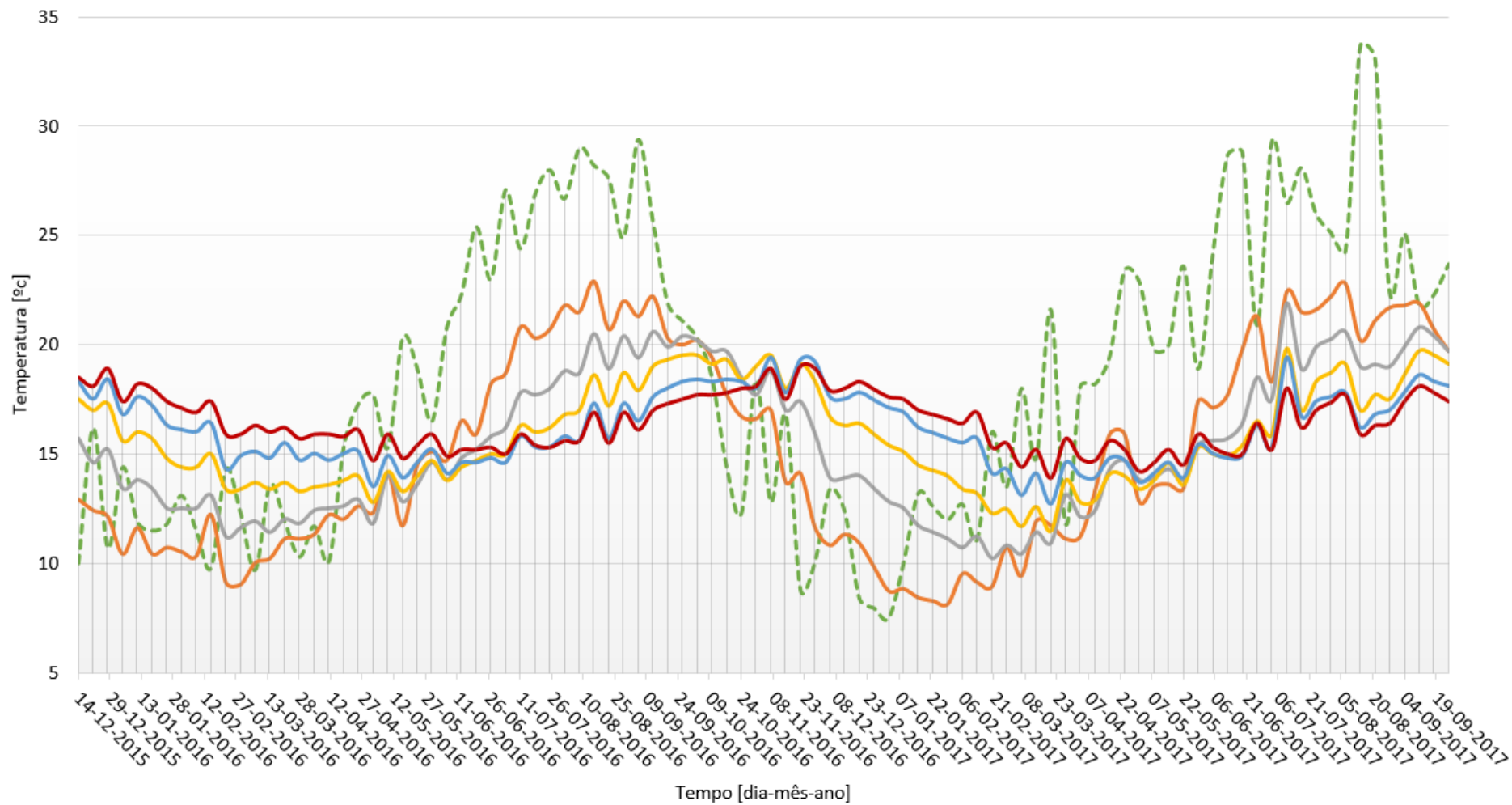


Figura 5.9 - Gráfico referente as leituras efetuadas ao longo do ano para as diferentes profundidades no local 1

5.3.1.2 - Local 2 - Reitoria_Baixo

O local seguinte escolhido para a monitorização da temperatura no solo foi nos terrenos da reitoria da Universidade da Beira Interior. Esta escolha baseou-se em utilizar outros os terrenos da Universidade da Beira Interior disponíveis.

Apesar das leituras neste local se terem iniciado num período mais tardio, é também possível observar as variações sazonais ao longo do ano, como é representado na figura 5.11. Um detalhe a ter em conta é a diferença das temperaturas ambiente durante os dois períodos de verão visíveis. Durante o mesmo período de tempo, compreendido entre o início de maio e final de agosto, o ano de 2017 foi mais quente em relação ao de 2016 por 2 °C. Da mesma forma a temperatura média dos solos foi de 13 °C para 2016 e 15,1 °C para 2017. Isto prova que o solo tende a acompanhar as variações de temperatura ambiente ao longo do ano. Este acompanhamento é feito sempre com algum tempo de diferença, ou seja, sempre que é registado um pico de temperatura, seja um máximo ou um mínimo, o solo apenas o demonstra alguns dias depois, novamente devido à elevada inércia do solo. Na entrada do período mais frio, a temperatura ao longo do solo apresenta um regime pouco estável até 3 m inclusive. Este facto é justificado pela mudança de temperatura ambiente e com o inerente aumento da pluviosidade que se faz sentir no local, denota-se o aumento da sua condutibilidade térmica e desse modo a perda de energia térmica acumulada durante o período quente do ano.

A figura 5.10 mostra a tendência dos valores da temperatura a uniformizar demonstrando a inercia do solo a com o aumento da profundidade. Neste local, a temperatura a 4 m e a 5 m de profundidade são muito idênticas, demonstrando que este solo, a partir desta profundidade, não é muito influenciado pelo regime sazonal.

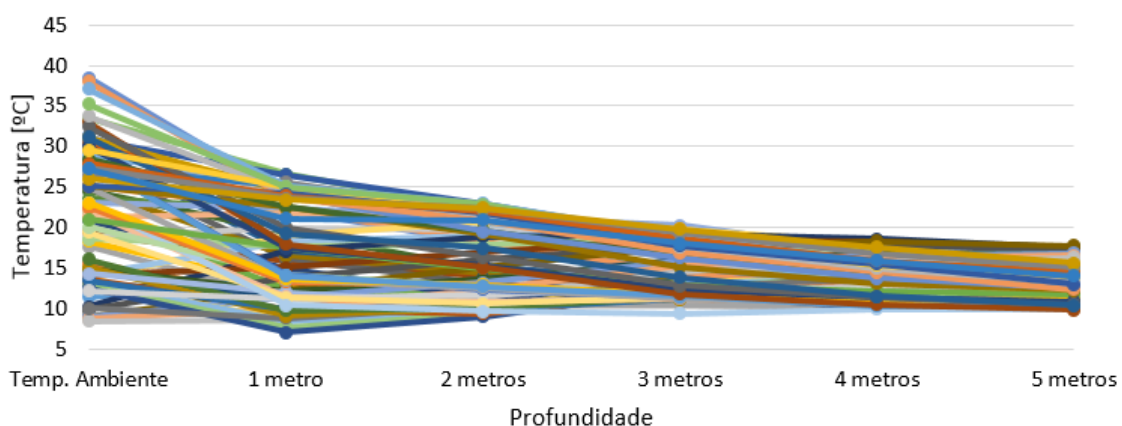


Figura 5.10 - Valores da temperatura medidas ao longo da profundidade no local 2

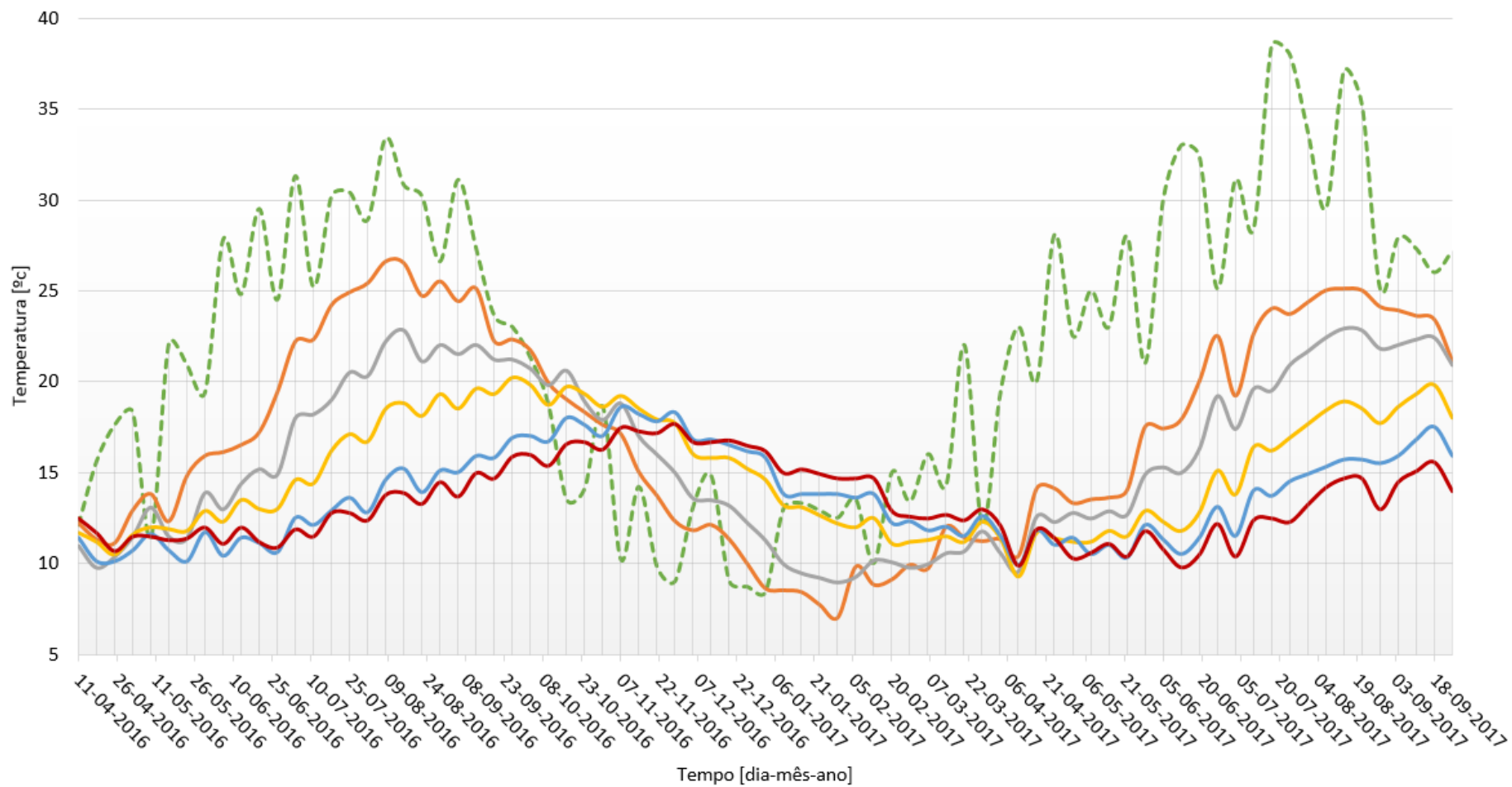


Figura 5.11 - Gráfico referente as leituras efetuadas ao longo do ano para as diferentes profundidades no local 2

5.3.1.3 - Local 3 - Reitoria_Cima

As medições neste local começaram dois meses mais tarde devido à concentração de material rochoso mais duro na sua superfície, o que dificultou a sua perfuração. Este local de recolha de leituras tem sombra ao longo do dia devido a árvores existentes no local, período este que ocorre apenas uma a duas horas por dia. Ainda assim, com os dados recolhidos é possível observar a primeira transição de estações e verificar a tendência do solo em acompanhar essa alteração.

Uma cuidada observação do gráfico da figura 5.13 permite visualizar que, durante o período de verão, a temperatura ambiente foi o dobro face à temperatura mais quente no solo, neste caso 1 metro de profundidade. Isto deve-se ao período de sombra, já mencionado, mas também devido ao facto de ter um tipo de solo bastante diferente do local 2, onde a temperatura mais alta do solo era muito próxima da temperatura ambiente. Isto demonstra que este tipo de solo é o indicado a funcionar como suporte de um sistema de arrefecimento.

O gráfico da figura 5.12 permite visualizar as leituras efetuadas neste local no decorrer do trabalho. Mais uma vez é possível observar que as elevadas temperaturas ambiente afetam cada vez menos a temperatura com o aumento da profundidade. É possível analisar uma homogeneidade logo a partir dos 3 m. Desta forma é possível obter uma relação custo e desempenho em relação aos outros locais.

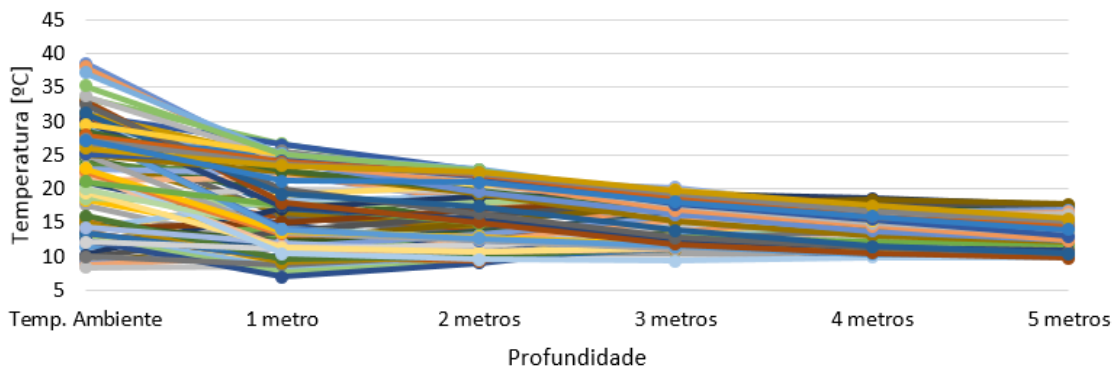


Figura 5.12 - Valores da temperatura medidas ao longo da profundidade no local 3

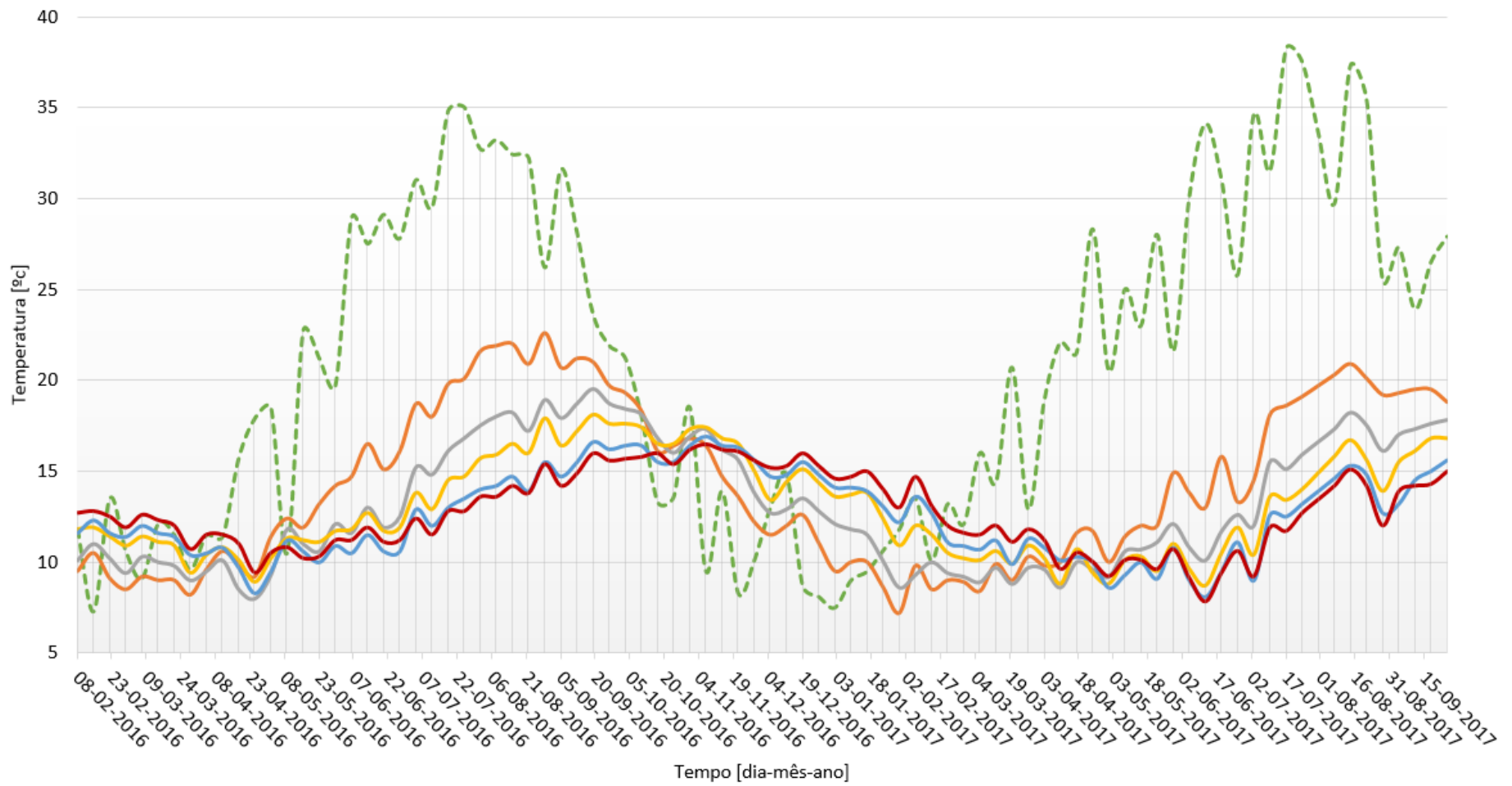


Figura 5.13 - Gráfico referente as leituras efetuadas ao longo do ano para as diferentes profundidades no local 3

5.2.1.4 - Análise granulométrica

Durante o período de perfuração dos orifícios para inserir as sondas, foi retirada uma amostra do solo de cada local. Assim foi possível efetuar um estudo e determinar o tipo de solo e tamanho das partículas ali existentes. Este estudo foi realizado no laboratório de Mecânica dos Solos do departamento de Engenharia Civil no âmbito do trabalho de Calado, 2016. Dada a importância do assunto, entendeu-se apresentar no presente as respetivas curvas granulométricas, apresentadas na figura 5.14.

Este estudo comprovou uma igualdade no que respeita à sua composição mineral, sendo elas de areias e areias siltsosas. Em relação à granulometria de cada zona, denotam-se algumas diferenças claras. A distância entre o local 2 e o local 3 é de 30 m, em linha reta, e mesmo assim apresentam tipologias diferentes. O local 3 é o que apresenta uma maior passagem de partículas mais finas, comparativamente aos restantes locais, diminuindo assim a sua condutibilidade térmica, ou seja, estes mantêm-se mais frescos no período de verão e mais quentes no período de inverno. Já o local 1 encontra-se situado a poucos metros de uma ribeira e contém partículas muito maiores, comparativamente aos outros locais. Deste modo, o espaço entre as partículas será ocupado com água, o que irá influenciar bastante a sua condutibilidade térmica, aumentando-a.

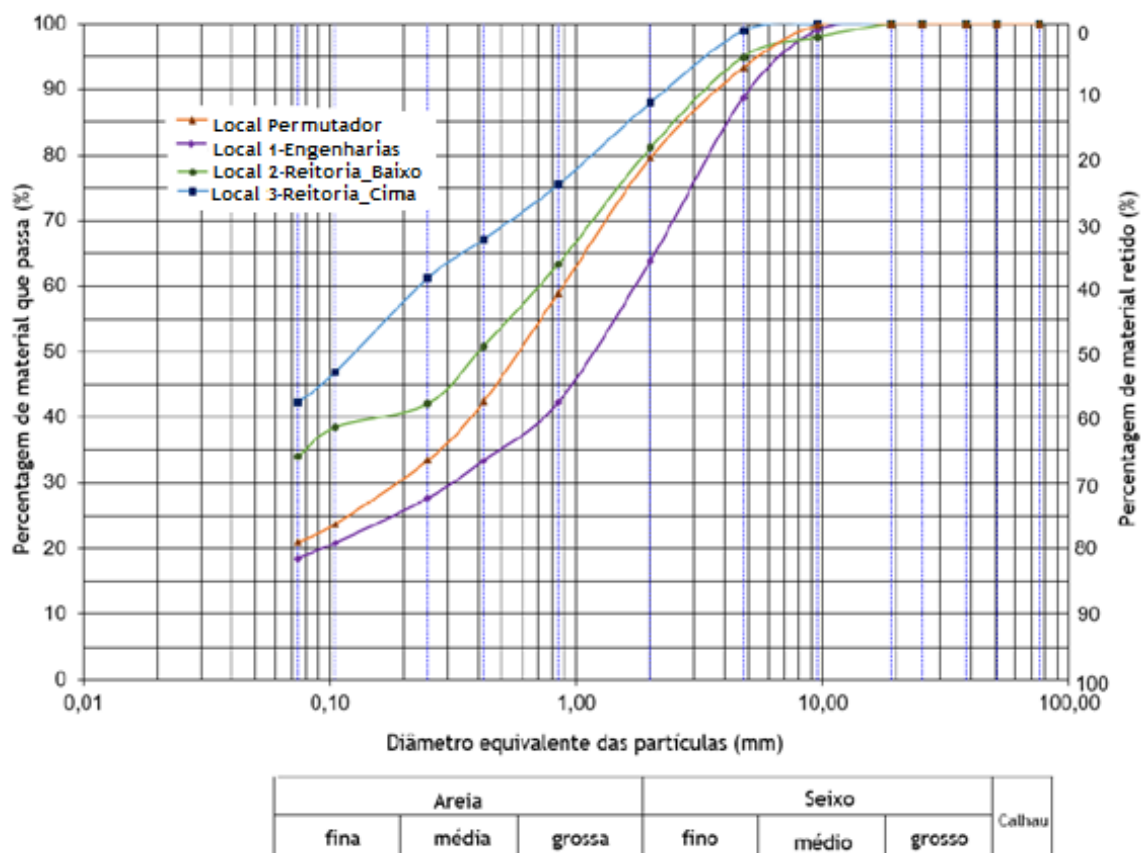


Figura 5.14 - Curvas granulométricas representativas das quatro amostras de solo. Adaptado de Calado, (2016)

5.3.1.5 - Comparação dos três locais

Após expostos os valores das temperaturas e o tipo de solo alusivo aos três locais referidos, é necessário fazer uma comparação entre os mesmos e perceber ao certo o que os distingue. A tendência das variações de temperatura mantém-se nos três locais, mas os valores da temperatura média nas diversas profundidades são bastante diferentes e têm comportamentos diferentes, quer no período de verão, quer no inverno.

A temperatura ambiente média no verão das duas zonas de medição, junto à reitoria da UBI, locais 2 e 3, apresenta-se muito similar variando apenas 1 °C, sendo mais baixo no local 2. Esta diferença mínima deve ser descartada, uma vez que os dois locais possuem a mesma exposição solar e estão bastante próximos. O local 1 é aquele que apresenta um valor de temperatura média mais baixa, devido ao facto de estar na zona de sombra de uma árvore de grande porte.

Apesar de ser a zona mais fresca no verão, os valores da temperatura no subsolo são os mais quentes. Este facto, já explicado anteriormente, deve-se à existência de partículas de maiores dimensões e de estar localizado perto de um curso de água, deste modo os espaços entre os grãos irão estar ocupados com água. Já os locais 2 e 3, respetivamente, estão localizados em terreno seco e a análise da sua granulometria permite observar que são constituídos por grãos muito mais finos, sendo a maioria da sua composição de origem mineral, logo menos condutores. O período de verão considerado foi desde meio de junho a meio de setembro e o período de inverno os restantes meses.

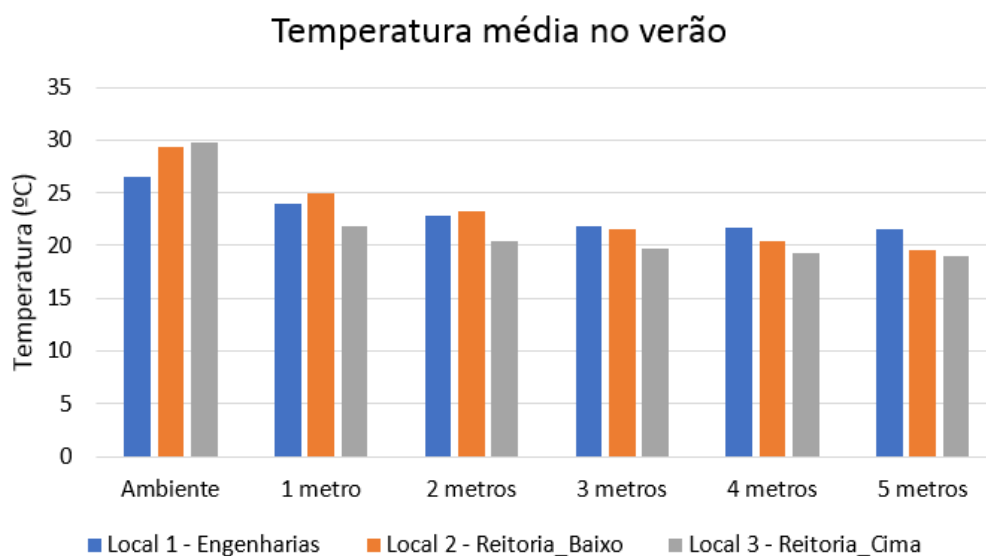


Figura 5.15 - Temperatura media no verão para os 3 locais nas diversas profundidades

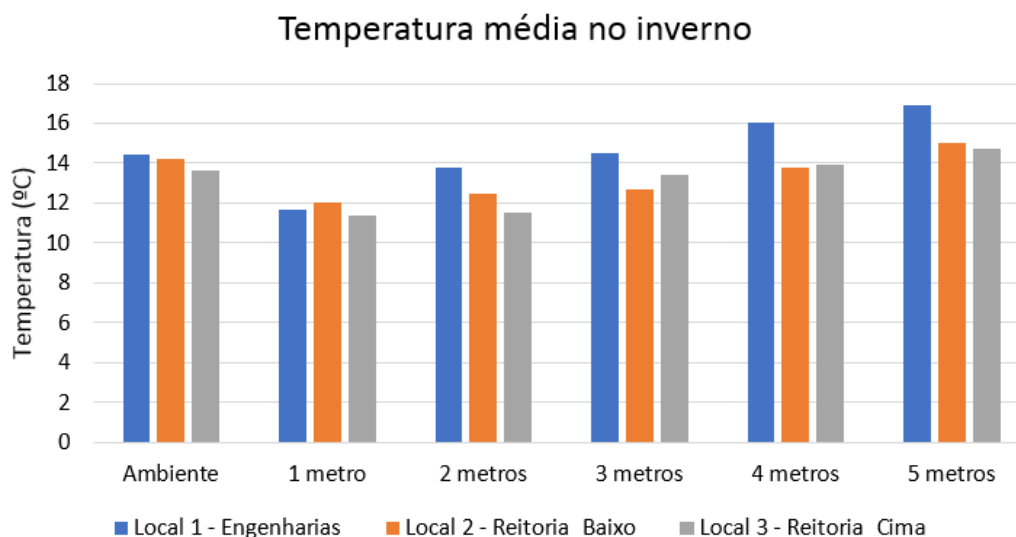


Figura 5.16 - Temperatura media no inverno para os 3 locais nas diversas profundidades

No inverno, a tendência é exatamente o oposto, quanto mais fundo mais quente o solo é. Isto deve-se à inércia do solo em manter a sua temperatura cada vez mais uniforme, ao longo da profundidade. Existem algumas diferenças entre os locais 2 e 3, ao longo da profundidade, mas que acabam por ser colmatadas entre si. Já o solo presente no local 1 é o que mantém a temperatura mais quente durante o período de inverno.

Desta forma, é possível verificar que qualquer um destes lugares é favorável à aplicação de um permutador ar-solo. No local 1, a 3 m de profundidade é possível obter uma boa relação entre custos e desempenho, pois é o local onde se consegue uma melhor temperatura a menor profundidade. Por outro lado, nos locais, 2 e 3 respetivamente, a profundidade ideal é perto dos 4 m, tirando o máximo proveito, quer durante os períodos de verão, quer de inverno.

5.3.2 - Aplicação do permutador ar-solo no armário de telecomunicações

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados referentes aos ensaios efetuados com a aplicação do permutador ar-solo no arrefecimento do armário de telecomunicações. Tal como explicado no capítulo 5.2, foram realizados três tipos de ensaio, com o intuito de expor a potencialidade da aplicação do permutador.

O primeiro tipo de ensaio baseou-se apenas no uso dos ventiladores encastrados no armário para expulsarem a carga térmica proveniente da resistência elétrica, que simulava os equipamentos no interior. Os ventiladores do armário, na sua potência máxima, forçavam o ar ambiente a entrar pelas ranhuras presentes nas laterais do armário para depois ser extraído no topo a uma velocidade media de 9,04 m/s, equivalente a um caudal volumétrico de 125,3 m³/h.

Este tipo de ensaio permitiu concluir que, para este tipo de armário, a ventilação existente é suficiente para temperaturas exteriores não excessivamente altas. O gráfico presente da figura 5.17 representa um ensaio efetuado no dia 17 de agosto de 2017, em que a temperatura ambiente média foi de 39 °C, tendo chegado ao pico de temperatura perto das 16h com 45,7 °C. A temperatura mais alta registada no interior do armário foi de 48 °C com a resistência interna a dissipar 450 W de carga térmica. Estes registos mostram que o dimensionamento dos ventiladores é correto, pois conseguem manter a temperatura dentro do armário dentro dos limites operacionais dos equipamentos. Apesar de as temperaturas não chegarem ao limite máximo determinado pelos fabricantes dos equipamentos, a longa exposição dos mesmos a elevadas temperaturas também diminui o seu tempo de vida útil.

Até às 11:35 o armário funcionou sem qualquer tipo de arrefecimento, tendo chegado muito perto dos 55 °C em pouco tempo. Os termopares 1, 2 e 3 devido à sua localização, registaram os valores mais altos enquanto os restantes se mantiveram iguais à temperatura ambiente. A essa hora os ventiladores foram acionados e a temperatura baixou rapidamente, pois foi expulsa toda a carga térmica acumulada que a convecção natural do armário não conseguia extrair e ainda mais alguma dissipada pela resistência. Após esse período todas as temperaturas registadas tendem a acompanhar a variação da temperatura ambiente até ao pôr-do-sol e por consequente, o término do ensaio.

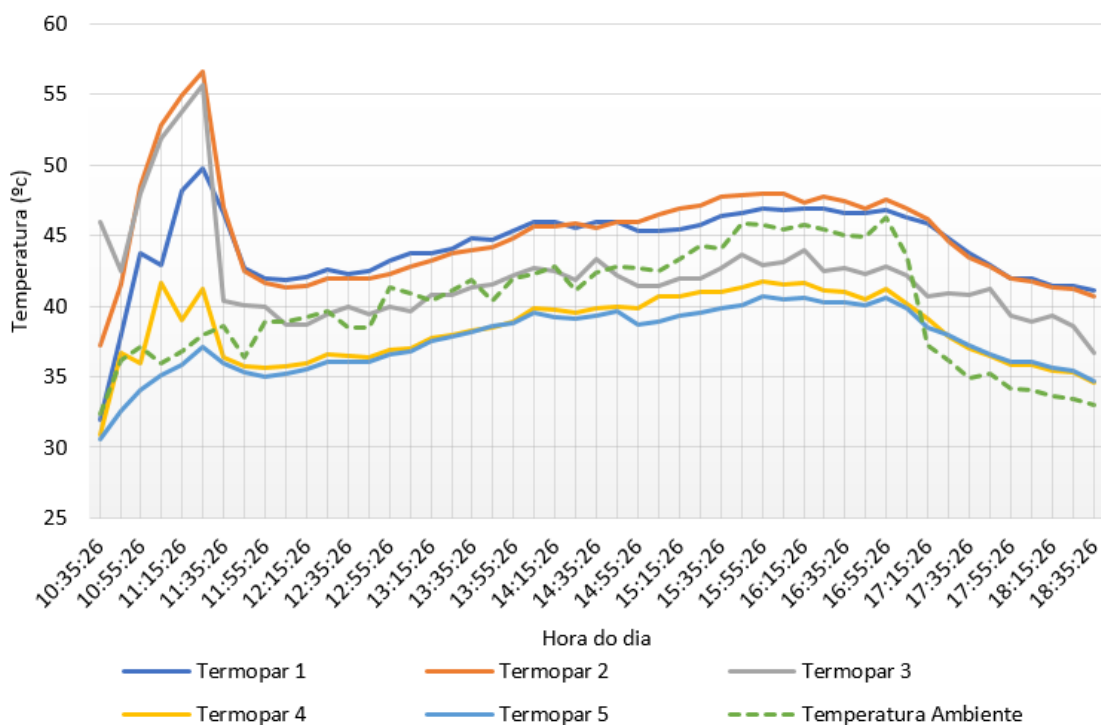


Figura 5.17 - Temperaturas obtidas ao longo do dia com a utilização de apenas os ventiladores do armário

Os ensaios realizados com recurso ao permutador ar-solo permitiram então um grande arrefecimento no interior do armário. Este deve-se ao facto de o caudal volúmico de ar ter sido aumentado e também pela entrada de ar com temperatura mais baixa que a ambiente no interior do mesmo. O ar era admitido pelo ventilador à entrada do permutador de calor ar-solo, onde era arrefecido no seu interior ao longo do tubo, à saída existia um outro ventilador que forçava o ar para a entrada inferior do armário. Esse ar era então redirecionado pela sucção gerada pelos ventiladores do armário e por consequente o arrefecimento do mesmo.

O gráfico que se apresenta na figura 5.18 mostra um ensaio realizado no dia 15 de agosto de 2017, com uma temperatura ambiente média de 37 °C, onde é possível observar que a temperatura ao longo do dia no interior do armário raramente passa o valor da temperatura ambiente, mesmo tendo a resistência interna no seu interior a dissipar 450 W. Isto deve-se ao facto de a potência de arrefecimento do sistema completo ser muito idêntico à potência calorífica gerada pela resistência elétrica. As temperaturas dos dois termopares localizados na zona inferior da fonte térmica apresentaram uma temperatura 4,5 °C mais baixa que a ambiente, face ao 1,1 °C obtido pelo sistema de arrefecimento sem o auxílio do permutador ar-solo, sendo este um valor demasiado baixo para se afirmar que existe diferença.

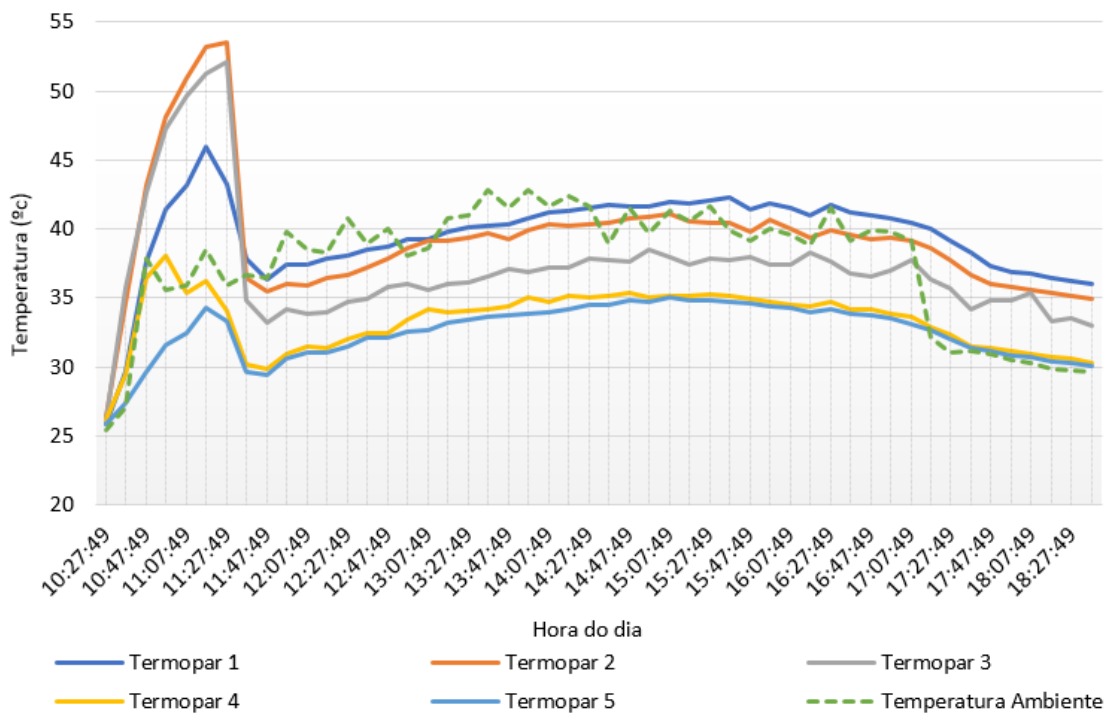


Figura 5.18 - Temperaturas obtidas ao longo do dia com a utilização do permutador de calor e respetivos ventiladores

O terceiro tipo de ensaio foi realizado no dia seguinte com as condições meteorológicas muito idênticas. Neste ensaio foi colocado um ventilador externo com o bocal da admissão de ar ligeiramente obstruído de forma a simular a velocidade do ar proveniente do ventilador ligado ao permutador ar-solo, do ensaio referido anteriormente. As condições de execução foram exatamente iguais. Neste tipo de ensaio a temperatura no interior do armário baixou, em média, 2 °C face aos ensaios sem qualquer ventilador exterior, obtendo assim uma temperatura média na ordem de 42,5 °C. Isto prova que o aumento do caudal volúmico de 125,3 m³/h para 134 m³/h ajuda no arrefecimento do interior do armário.

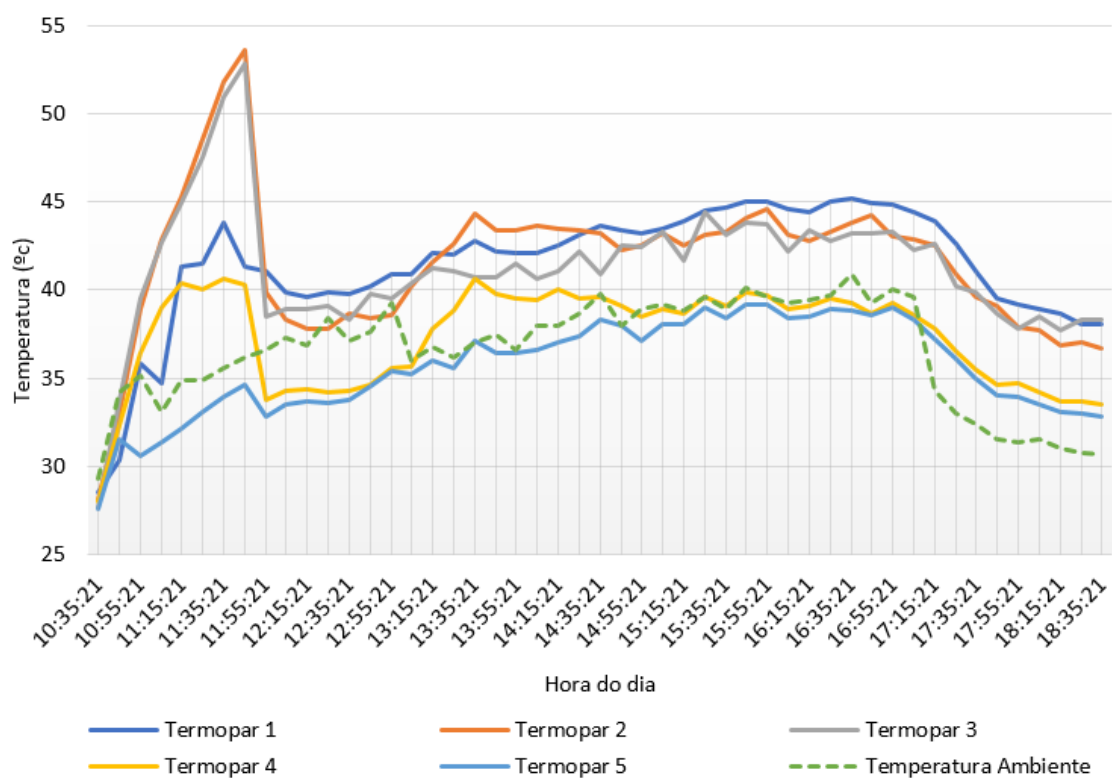


Figura 5.19 - Temperaturas obtidas ao longo do dia com a utilização do permutador de calor e respetivos ventiladores

De forma a comparar os três tipos de ensaio, foi gerado um gráfico onde é possível observar as três curvas relativas ao termopar 2, situado acima da caixa, como se pode ver na figura 5.20. Nesta é possível observar a grande diferença entre a utilização dos ventiladores externos com o permutador juntamente com os ventiladores já existentes no armário, comparativamente ao arrefecimento apenas com os ventiladores do armário. Também é possível denotar a diferença entre o arrefecimento entre o uso do permutador de calor ar-solo com o arrefecimento auxiliado por um ventilador externo de forma a igualar o caudal volúmico de ar a ser forçado para o interior do armário. Apesar de ambos os sistemas de arrefecimento terem o mesmo caudal, o sistema que usa o permutador consegue obter uma temperatura no interior do armário mais baixa. A temperatura média ambiente foi de 39 °C para o ensaio com apenas os ventiladores do armário (a cinza), 37 °C para o ensaio onde foi simulada a ligação ao permutador ar-solo através de um ventilador com a entrada obstruída (a laranja) e também de 37 °C para o ensaio com o permutador ar-solo (a azul).

Para o caso dos ensaios representados pelas cores azul e cinza é possível observar uma diferença média de aproximadamente 6,3 °C. A temperatura média dentro do armário com o arrefecimento auxiliado pelo permutador de calor foi de 38,9 °C, já para o arrefecimento sem o auxílio do permutador foi de 45,2 °C.

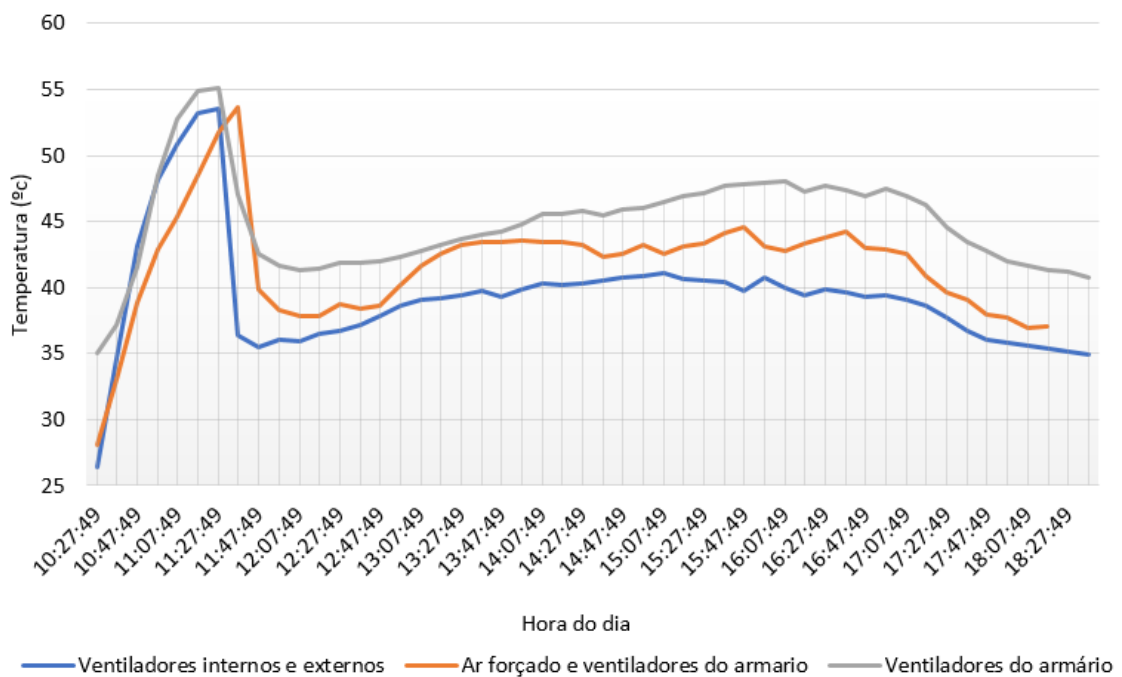


Figura 5.20 - Comparação da temperatura dos 3 ensaios

De forma a comparar o desempenho de cada sistema, foi calculada a potência de arrefecimento originada pelo conjunto dos ventiladores e do permutador ar-solo, através da fórmula 5.2, tendo-se calculado esses valores para os ensaios da figura 5.20. A figura 5.21 representa a potencia de arrefecimento para os 3 tipos de arrefecimento onde rapidamente percebe-se que com a aplicação do permutador ar-solo a potencia de arrefecimento aumenta. Com o auxilio do permutador, é possível aumentar a potencia de arrefecimento em 62 W face ao sistema de arrefecimento onde é usado um ventilador externo para aumentar o caudal mássico de ar juntamente com os originais do armário e 139 W mais potente que usando apenas os ventiladores originais do armário.

No gráfico da imagem 5.21 também se pode observar claramente que a potência de arrefecimento diminui com o aumento da temperatura ambiente. Esta situação deve-se ao ar à entrada do permutador ser mais quente e este acaba por não ter a capacidade de arrefecer o ar a uma temperatura mais baixa como desejado, mandando assim ar mais quente para o armário, dificultando o seu arrefecimento. O COP do sistema com o permutador foi de 8, bem acima do sistema de ar-condicionado que é aproximadamente 2.

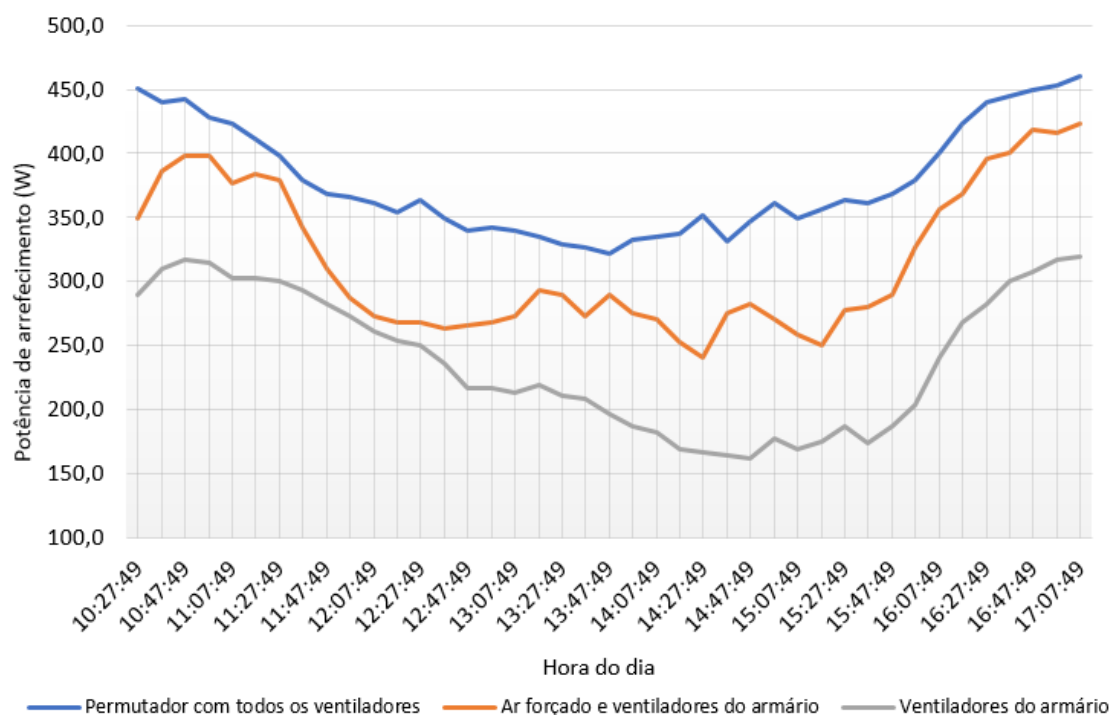


Figura 5.21 - Comparação das potências de arrefecimento para os 3 tipos de ensaios

A potência máxima de arrefecimento com o permutador rondou os 450 W, este valor é igual à potência elétrica consumida pela resistência no interior do armário. Isto prova o porquê de, durante alguns ensaios efetuados, a temperatura no interior do armário ser igual à temperatura ambiente, como mostra a figura 5.22. O ensaio referido foi realizado no dia 15 de agosto de 2017, onde toda a carga térmica gerada pela resistência era dissipada pelo sistema de ventilação, quer com o permutador, quer com todos os ventiladores.

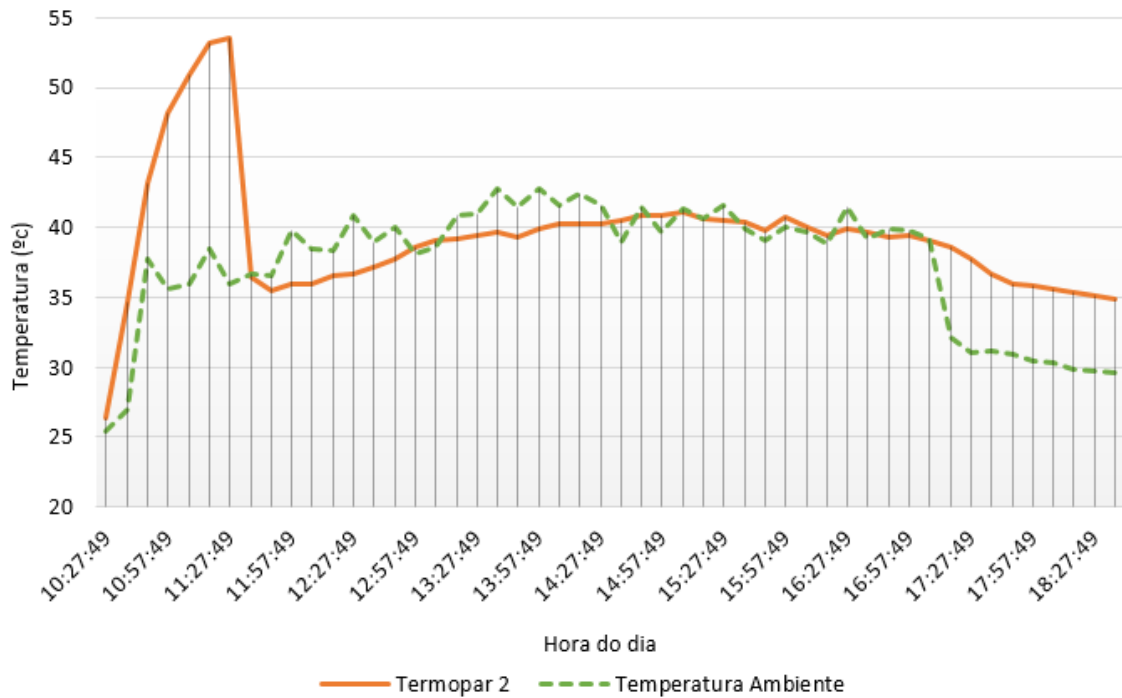


Figura 5.22 - Comparação da temperatura no interior do armário com a temperatura ambiente ao longo do dia no ensaio do dia 15 de agosto

O valor da temperatura registada na saída do permutador era significativamente mais baixa, que a registada na entrada do armário. Durante este percurso, o ar arrefecido percorreu aproximadamente 130 cm de tubo de alumínio isolado a lã de vidro, era orientado para o ventilador passando depois por outro tubo PVC igualmente isolado de 25 cm de comprimento até a entrada do armário. No total, o ar percorre 150 cm em tubo isolado e 30 cm no ventilador exposto a radiação solar. Esta distância fez com que o ar ganhasse uma carga térmica elevada devido à radiação solar incidente e também devido à temperatura ambiente.

Em média, o ar aqueceu aproximadamente 8 °C entre a saída do permutador e a entrada no armário, resultando numa perda térmica de arrefecimento de 42 W, valor calculado através do caudal mássico e da diferença de temperatura registada. Este valor representa aproximadamente 10% da potência de arrefecimento do permutador de calor. A figura 5.23 representa um ensaio realizado no dia 13 de julho de 2017, onde essa diferença de temperatura foi bastante elevada tendo sido originada pela forte incidência solar do dia (IPMA, 2017).

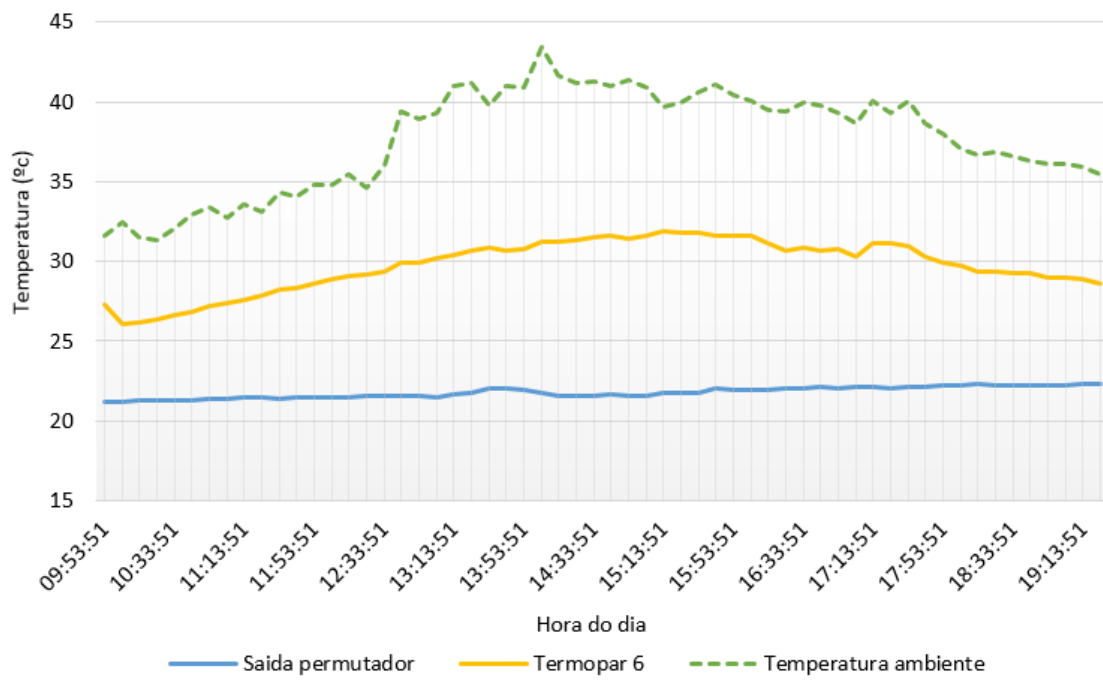


Figura 5.23 Representação da temperatura à saída do permutador com a de entrada no armário

6 - Conclusão

A redução do consumo energético é, sem dúvida, em ato fundamental nos dias de hoje, caso contrário as próximas gerações irão sofrer de alguma forma os erros cometidos pelos seus antecessores. Atendendo a esta premissa, a presente dissertação apresentou uma solução que permite a substituição dos sistemas convencionais de arrefecimento que têm um consumo energético bastante elevado. Desta forma, foram realizados ensaios com a utilização do permutador de calor ar-solo, tendo sido comparados os seus resultados com os sistemas típicos apresentando os valores de potencia de arrefecimento bastante superiores.

Será agora apresentada neste último capítulo, uma revisão do trabalho desenvolvido, indicando os pontos fulcrais presentes ao longo do trabalho. Com as conclusões obtidas previamente, sugerem-se também alguns trabalhos que possam contribuir para um estudo mais aprofundado desta matéria.

6.1 - Recapitulação

As empresas fornecedoras de serviços de telecomunicações móveis têm sido obrigadas a aumentar as suas infraestruturas para fazer face ao aumento de utilizadores subscritos aos seus serviços. Esta situação obriga à criação de cada vez mais locais para colocação dos seus equipamentos de telecomunicação. Nestes locais são colocados diversos tipos de equipamentos para o normal funcionamento incluindo um armário onde é colocado todo o equipamento mais sensível de telecomunicação. Estes armários têm então a função de proteger os equipamentos eletrónicos assim como climatizá-los corretamente. Os sistemas de arrefecimento presentes nestes armários são geralmente constituídos por ventiladores que forçam o ar quente, gerado pelos equipamentos, pelas ranhuras do armário ou usam sistemas convencionais de ar-condicionado, que apresentam um elevado consumo energético e elevados custos de manutenção. Estes sistemas consomem um total de 25% a 50% de uma estação base de telecomunicações.

Face a este problema, estudou-se a possibilidade de utilizar a inércia térmica do solo, como solução de arrefecimento. Ao longo do ano, a temperatura do solo pouco varia a uma determinada profundidade. No verão, essa temperatura tende a ser bastante mais baixa que a temperatura ambiente, e, no inverno, a temperatura no solo tende a ser mais quente. Para testar esta solução foi previamente enterrado um permutador com aproximadamente 29 m de comprimento, a uma profundidade até 3 m. Na sua construção foi usado PVC, devido às suas características térmicas, com um diâmetro de 7,5 cm. No mesmo local foi também colocado um armário de telecomunicações ABE_V2, o mesmo usado pela empresa que monta grande parte das instalações em Portugal. O armário foi preparado com uma resistência elétrica no seu interior, de modo a simular a carga térmica dissipada pelos equipamentos eletrónicos a

funcionar na sua utilização máxima, 450 W no total. De forma a acomodar os periféricos que seriam montados mais tarde, como os termopares e ventiladores, foram feitas outras alterações na sua estrutura.

Neste seguimento, foram realizados três tipos de ensaios diferentes, de forma a poder haver parâmetros de comparação. Os ensaios ocorreram, no período de verão, sempre durante 9h tendo sido iniciados perto das 9:30h até às 18:00h, de forma a expor o armário à máxima radiação solar. Assim, o primeiro ensaio utilizou os ventiladores embutidos no armário para extrair a carga térmica gerada pela resistência elétrica. O resultado foi que este sistema conseguiu obter uma potência de arrefecimento de 240 W. Desta forma, acumulou-se bastante carga térmica dentro do armário chegando a uma temperatura de 48 °C. Apesar deste valor de temperatura ser inferior ao recomendado pelos fabricantes, a sua longa exposição deteriorará os componentes eletrónicos.

Após este ensaio, foi realizado o ensaio com o recurso ao permutador. Neste caso foi preciso aumentar o caudal volúmico de ar, pois foi necessário forçar o ar para dentro do permutador com um ventilador exterior e um outro igual montado na outra extremidade do permutador, a forçar o ar para dentro do armário. O ensaio decorreu com os mesmos parâmetros já referidos, tendo sido possível atingir uma potência máxima de arrefecimento de 450 W, numa média de 380 W. Este valor representa uma melhoria de 56% face ao sistema previamente ensaiado.

Durante este ensaio surgiu a questão de o facto de se ter aumentado o caudal volúmico de 125,3 m³/h para 134 m³/h, faria muita diferença em termos de potência de arrefecimento. Desta forma, foi efetuado mais um ensaio onde foi utilizado um ventilador externo a forçar o ar a temperatura ambiente com o mesmo caudal volúmico, que era forçado o ar para dentro do armário quando estava interligado com o permutador. Os resultados deste ensaio mostram que o aumento do caudal volúmico aumenta a potência de arrefecimento, mas ainda assim, a sua potencia foi 20% mais baixa do que o ensaio com o permutador.

Após a apreciação dos resultados obtidos, é seguro afirmar que o solo pode ser utilizado como sistema de arrefecimento de armários de telecomunicações. A sua utilização é um passo na diminuição do consumo energético dos sistemas de telecomunicações e, por conseguinte, na redução de custos, quer na implementação, quer na manutenção.

6.2 - Sugestão para trabalho futuro

Após a realização deste trabalho, surgem alguns aspetos que poderão ser avaliados num trabalho futuro, com o intuito de um melhor aproveitamento do sistema. A melhoria do desempenho do arrefecimento do armário de telecomunicações é possível, mas para isso é preciso observar alguns aspetos, nomeadamente os ganhos de carga térmica existentes entre a saída do permutador até à entrada do armário que chegam a diminuir em 10% da potência de arrefecimento do permutador. Esta deve-se ao facto de a colocação do armário estar afastada da extremidade do permutador e, como tal, ser absorvida radiação pela tubagem. Uma melhoria seria então a colocação do armário de telecomunicações diretamente por cima do permutador, eliminando assim esta perda térmica.

Propõem-se ainda uma análise económica da sua implementação a uma maior escala de forma a analisar os custos e determinar o tempo de retorno do investimento. Outra proposta de investigação passa pela utilização do permutador de calor ar-solo no inverno, para aquecimento do armário, em locais onde as temperaturas no exterior sejam negativas.

Referências bibliográficas

- 42U. (2012). 42U Rack Dimensions & Specifications. Retrieved from <http://www.42u.com/42U-cabinets.htm>
- Ahmed, S. F., Khan, M. M. K., Amanullah, M. T. O., Rasul, M. G., Hassan, N. M. S. (2015). Performance assessment of earth pipe cooling system for low energy buildings in a subtropical climate. *Energy Conversion and Management*, 106, 815-825. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.030>
- Ahmed, S. F., Amanullah, M. T. O., Khan, M. M. K., Rasul, M. G., Hassan, N. M. S. (2016). Parametric study on thermal performance of horizontal earth pipe cooling system in summer. *Energy Conversion and Management*, 114, 324-337. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.061>
- Anderson, W. (1998). *Reliability of High Temperature Electronic Components* doi:10.1109/HITEC.1998.676777
- Badgaiyan, P., Agrawal, S. (). CFD Base Performance Evaluation of Earth-Air Tube Heat Exchanger for Natural Air Conditioning. *IJMER*, 2(4), 25-30. Retrieved from: http://www.ijmer.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/4211.pdf
- Banks, D. (2012). *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*, Oxford: Blackwell Publishing, pp.348.
- Bansal, V., Misra, R., Das Agarwal, G., e Mathur, J. (2013). Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger. *Applied Energy*, 103, 1-11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.014>
- Barakat, S., Ramzy, A., Hamed, A. M., Emam, S. H. (2016). Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system. *Energy Conversion and Management*, 111, 137-146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.060>
- Bear, J. (1988). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: Dover Publications.
- Benhammou, M., Draoui, B. (2015). Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 348-355. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.030>
- Bezyan, B., Porkhial, S., Mehrizi, A. A. (2015). 3-D simulation of heat transfer rate in geothermal pile-foundation heat exchangers with spiral pipe configuration. *Applied Thermal Engineering*, 87, 655-668. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.051>
- Bianco, C., Cucchiatti, F., Griffa, G., Xiaoming, K., Qiao, C., Yuping, H., Gemma, P., Liqian, Z. (2009). *An update on the field trial concerning underground solution for FTTCab architecture*. doi: [10.1109/INTLEC.2009.5352050](https://doi.org/10.1109/INTLEC.2009.5352050)
- Bilimtreni. (2012). Gezin Haberleşme Sistemleri ve Onların Gelişim Süreci. Retrieved from <http://www.bilimtreni.com/gezin-haberlesme-sistemleri-ve-onlari-gelisim-sureci/>
- Bisoniya, T. S., Kumar, A., Baredar, P. (2014). Parametric analysis of Earth-air heat exchanger system based on CFD modelling. *International Journal of Power and Renewable Energy Systems*, 1, 36-46.
- Bojic, M., Trifunovic, N., Papadakis, G., Kyritsis, S. (1997). Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building. *Energy*, 22 (12), 1151-1158. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(97\)00055-8](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00055-8)

- Bundesverband Geothermie (2017). Encyclopædia Britannica. Retrieved from <https://www.britannica.com/science/geothermal-energy>
- Calado, A. (2016). *Monitorização da temperatura do solo. Desenvolvimento e estudo experimental de um permutador de calor ar-solo* (Unpublished master's thesis) Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Çankaya, B. (2015). Gezin Haberleşme Sistemleri ve Onların Gelişim Süreci. Retrieved from <http://www.bilimtreni.com/gezin-haberlesme-sistemleri-ve-onlarin-gelisim-sureci/>
- Çengel, Y.A., Boles, M.A. (2001). *Termodinâmica*. Lisboa: McGraw-Hill.
- Chel, A., Tiwari, G. N. (2009). Performance evaluation and life cycle cost analysis of earth to air heat exchanger integrated with adobe building for New Delhi composite climate. *Energy and Buildings*, 41 (1), pp. 56–66 doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.006>
- Chen, Y., Zhang, Y., Meng, Q. (2012). Study of ventilation cooling technology for telecommunication base stations: Control strategy and application strategy. *Energy and Buildings*, 50, 212–218. doi: [10.1016/j.enbuild.2012.03.040](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.040)
- Cook, J. (1989). *Passive cooling*. Cambridge: MIT Press.
- Delgado, C. (2016). *Estudo experimental e simulação computacional do escoamento interior num armário de telecomunicações* (Unpublished master's thesis) Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Diaz, S. E., Sierra, J. M. T., Herrera, J. A. (2013). *The use of earth–air heat exchanger and fuzzy logic control can reduce energy consumption and environmental concerns even more*. *Energy and Buildings*, 65, 458-463. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.028>
- Diaz-Mendez, S. E., Patiño-Carachure, C., Herrera-Castillo, J. A. (2014). Reducing the energy consumption of an earth–air heat exchanger with a PID control system. *Energy Conversion and Management*, 77, 1-6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.033>
- Dokkar, H., Negrou, B., Chenouff, N., Settou, N., Benmhidi A. (2010). Passive cooling of telecom shelter using solar chimney with earth-air heat exchanger. In: V. Niola (Ed.), *Recent Advances in Energy, Environment, Biology and Ecology* (pp. 134–138). Tenerife: WSEAS Press.
- Duarte, M., Silva, P., Pires, L., Gaspar, P. (2015). *Estudo numérico do desempenho térmico de um armário exterior para equipamentos de telecomunicações móveis*. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/286938133_Estudo_numerico_do_desempenho_termico_de_um_armario_exterior_para_equipamentos_de_telecomunicacoes_moveis
- EBM PAPST (2017). 4318 DC axial compact fan Retrieved from http://www.ebmpapst.com.br/pt_br/products/compact-fans/axial_compact_fans/axial_compact_fans_detail.php?pID=54101
- Ferreira, A. (2000). Dados geoquímicos de base de sedimentos fluviais de amostragem de baixa densidade de Portugal continental: Estudo de factores de variação regional (Master's thesis, Universidade de Aveiro). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10400.9/542>
- Florides, G., Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. *Renewable Energy*, 32, 2461–2478. doi: [10.1016/j.renene.2006.12.014](https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014)
- Freire, A. (2008). *Análise de Sistemas Compactos de Arrefecimento por Tubos Enterrados para Edifícios Multifamiliares* (Master's thesis Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) Retrieved from <http://hdl.handle.net/10216/57924>

- Gan, G. (2017). Dynamic thermal simulation of horizontal ground heat exchangers for renewable heating and ventilation of buildings. *Renewable Energy*, 103, 361-371. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.052>
- Ghosal, M. K., Tiwari, G. N. (2006). Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse. *Energy Conversion and Management*, 47, 1779–1798. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.001>
- Givoni, B. (2007). Cooled soil as a cooling source for buildings. *Solar Energy*, 81(3), 316-328. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.07.004>
- Grotzinger, J. (2007). *Understanding Earth*. New York: W. H Freeman and Company.
- Haghighi, E. (2016). *Free cooling: a complete solution on reducing total energy consumption for telecommunication base stations*. doi: [10.1109/INTLEC.2016.7749128](https://doi.org/10.1109/INTLEC.2016.7749128)
- Hendrix, M., Allen, L. (2010). *CFD modeling and thermal test results for telecommunications shelter cooling systems*. doi: [10.1109/INTLEC.2010.5525705](https://doi.org/10.1109/INTLEC.2010.5525705)
- Hernandez, G., Dakurah, H., Denman, A., Nikiforuk, A. (2007). The competitiveness of geothermal technology as microgeneration. Retrieved from <http://slideplayer.com/slide/9720337/>
- Hollmuller, P., Lachal, B. (2001). Cooling and preheating with buried pipe systems: monitoring, simulation and economic aspects. *Energy and Buildings*, 33 (5), 509-518. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00105-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00105-5)
- Huawei. (2006). GSM BTS312 hardware structure Retrieved from <https://pt.slideshare.net/Thininh/ome201101-gsm-bts312-hardware-structure-issue40>
- Huawei. (2016). Indoor Macro Base Station BTS3900. Retrieved from <http://e.huawei.com/en/products/wireless/gsm-r/radio-access-network/bts3900>
- Huawei. (2017). BTS3012 indoor macro base station. Retrieved from http://m.huawei.com/en/mobile/enterprise/products/wireless/gsm-r/gsmr/en_bts3012.htm
- Instituto Português do Mar e Atmosfera, IPMA (2017). Boletim Climatológico, julho 2017 - Portugal Continental. Retrieved from http://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20170811/wySMNIIGMBxApbltKccM/cli_20170701_20170731_pcl_mm_co_pt.pdf
- Joshi, Y., Azar, K., Blackburn, D., Lasance, C. J., Mahajan, R., Rantala, J. (2003). How well can we assess thermally driven reliability issues in electronic systems today? Summary of panel held at the Thermnic 2002. *Microelectronics journal*, 34(12), 1195-1201. doi: [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(03\)00200-3](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(03)00200-3)
- Kannan, N. (2012). *Design and Modeling Techniques for Cooling of Telecommunication Systems* (Master's thesis, University of Texas at Arlington). https://uta-ir.tdl.org/uta-ir/bitstream/handle/10106/9529/Kannan_uta_2502M_11354.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Keynote Telecom Technology. (2017). Wireless BTS for ZTE BTS Base Station ZXSDR B8300 Cabinet Support 81 carriers. Retrieved from <http://www.telecommunicationbts.com/sale-3859962-wireless-bts-for-zte-bts-base-station-zxsdr-b8300-cabinet-support-81-carriers.html>
- Keynote Telecom Technology. (2017). Wireless BTS for ZTE BTS Base Station ZXSDR B8300 Cabinet Support 81 carriers. Retrieved from <http://www.telecommunicationbts.com/sale-3859962-wireless-bts-for-zte-bts-base-station-zxsdr-b8300-cabinet-support-81-carriers.html>

- Khabbaz, M., Benhamou, B., Limam, K., Hollmuller, P., Hamdi, H., Bennouna, A. (2016). Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air-cooling in a residential building in hot semi-arid climate. *Energy and Buildings*, 125 (1), 109–121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.071>
- Kwang, H.L., Strand, R. K. (2008). Strand The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. *Energy and Buildings*, 40, 486–494. doi: [10.1016/j.enbuild.2007.04.003](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.003)
- Laboratório nacional de energia e geologia (2017). LNEG. Retrieved from <http://www.lneg.pt/download/3259/cap2.pdf>
- Lakshminarayanan, V., Sriraam, N. (2014). *The effect of temperature on the reliability of electronic components*. doi: [10.1109/CONECCT.2014.6740182](https://doi.org/10.1109/CONECCT.2014.6740182)
- Lee, K. H., Strand, R. K. (2008). The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. *Energy and Buildings*, 40 (4), 486–494. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.003>
- Lopes, F. (2012). Dimensionamento de um permutador de calor terra-ar e avaliação de impacto na climatização de um edifício (Master's thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa). Retrieved from <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395144980305/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>
- Lubritto, C., Petraglia, A., Vetromile, C., Curcuruto, S., Logorelli, M., Marsico, G., D'Onofrio, A. (2011). Energy and environmental aspects of mobile communication systems. *Energy*, 36, 1109-1114. doi: [10.1016/j.energy.2010.11.039](https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.11.039)
- Manjul, R. R., Bartaria, V.N. (2016). Earth air heat exchanger performance in summer cooling for various supply air conditions - a review. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 35(8), 387-390. doi: <http://www.ijettjournal.org/archive/ijett-v35p278>
- Mariam, F., Raju, U., Mulay, V., Agonafer, D., Sivanandan, D., Hendrix, M. (2009). *Thermal design considerations of air-cooled high-powered telecommunication cabinet*. doi: [10.1109/STHERM.2009.4810767](https://doi.org/10.1109/STHERM.2009.4810767)
- Miller, A. (1953). *The skin of the earth*. Methuen And Co. Ltd.; London.
- Mogharreb, M. M., Abbaspour-Fard, M. H., Goldani, M., Emadi, B. (2014). The effect of greenhouse vegetation coverage and area on the performance of an earth-to-air heat exchanger for heating and cooling modes. *International Journal of Sustainable Engineering*, 7(3), 245-252. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/19397038.2013.811559>
- Moraes, C.C.F. (s.d.). Anemômetro a quente. Retrieved from http://www.dee.ufrn.br/~luciano/arquivos/ins_ele/Apresenta%E7%F5es_2008_2/CAYO%20CID/Instrumentao_Eletrnica_Cayo_Cid_200321285_AFQ.pdf
- Muralidharan, B., Mariam, F. A. I., Mulay, V., Agonafer, D., & Hendrix, M. (2009). *Impact of Double Walled Telecommunication Cabinet on Solar Load-Natural and Forced Convection*. ASME. doi:10.1115/InterPACK2009-89340
- Nörtershäuser, D., Masson, S., Volkov, T., Huttunen, J., Douchet, F. (2014). *Liquid cooling for mobile base station*. doi: [10.1109/INTLEC.2014.6972174](https://doi.org/10.1109/INTLEC.2014.6972174)
- Oliveira, A. (2013). *Tubos enterrados para aquecimento e arrefecimento de edifícios: efeito das condições de fronteira e do caudal variável. Caso de estudo do edifício Solar XXI* (Master's thesis Universidade de Lisboa) Retrieved from <http://hdl.handle.net/10451/10485>
- Oliveira, P. (2015). *Fundamentos de termodinâmica aplicada – Análise energética e exergetica*. Lisboa: LIDEL.

- Oliveira, P. J. (2014). Transmissão de Calor – Introdução. Retrieved from <http://webx.ubi.pt/~pipo/TransCal4.pdf>
- Peter Rodgers, P., Eveloy, V. (2004). Prediction of microelectronics thermal behavior in electronic equipment: status, challenges and future requirements. *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, 1 (1), 16-29. doi: <https://doi.org/10.4071/1551-4897-1.1.16>
- Riches, S., Johnston, C. (2015). *Electronics design, assembly and reliability for high temperature applications*. doi: [10.1109/ISCAS.2015.7168844](https://doi.org/10.1109/ISCAS.2015.7168844)
- Rodgers, P. (2004). Prediction of microelectronics thermal behavior in electronic equipment: status, challenges and future requirements. *Journal of microelectronics and electronic packaging*, 1(1), 16-29. doi: <https://doi.org/10.4071/1551-4897-1.1.16>
- Roy, S. (2008). *Energy logic: A road map to reducing energy consumption in telecommunications networks*. doi: [10.1109/INTLEC.2008.4664025](https://doi.org/10.1109/INTLEC.2008.4664025)
- Sanjeev Jakhar, S., Misra, R., Bansal, V., Soni, M.S. (2015). Thermal performance investigation of earth air tunnel heat exchanger coupled with a solar air heating duct for northwestern India. *Energy and Buildings*, 87, 360–369. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.070>
- Santamouris, M., Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, 57, 74-94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>
- Sharan, G., Sahu, R.K, Jadhav, R. (2002). *Air-Cooling and Heating System for Tiger in Zoo using Earth Tube Heat Exchanger*. Retrieved from: <http://EconPapers.repec.org/RePEc:iim:iimawp:wp00005>
- Sharan, G., Prakash, H., Jadhav, R. (2004). *Performance of Greenhouse Coupled to Earth-Tube-Heat-Exchanger in Closed-Loop Mode*. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/5113538_Performance_of_Greenhouse_Coupled_to_Earth-Tube-Heat-Exchanger_in_Closed-Loop_Mode
- Staniec, M., Nowak, H. (2011). Analysis of the earth-sheltered buildings' heating and cooling energy demand depending on type of soil. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11 (1), 221-235. doi: [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60185-X](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60185-X)
- Sun, X., Zhang, Q., Medina, M., Liao, S. (2015). Performance of a free-air cooling system for telecommunications base stations using phase change materials (PCMs): In-situ tests. *Applied Energy*, 147, 325–334. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.046>
- Tan, L., Love, J. A. (2013). A literature review on heating of ventilation air with large diameter earth tubes in cold climates. *Energies*, 6(8), 3734-3743. doi: [10.3390/en6083734](https://doi.org/10.3390/en6083734)
- UM. (2017). Universidade do Minho. Retrieved from <http://www.dct.uminho.pt/>
- Wankhede, M. , Khaire, V., Goswami A., Mahajan S. D. (2008). *Evaluation of cooling solutions for outdoor electronics*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/0801.1043>
- Webb, R., Kim, N.H. (2005). *Principles of enhanced heat transfer*. New Jersey John Wiley & Sons, Inc.
- Woodson, T., Coulibaly, Y., Traoré, E. S. (2012). Earth-Air Heat Exchangers for Passive Air Conditioning: Case Study Burkina Faso. *Journal of Construction in Developing Countries*, 17 (1), 21–32. Retrieved from: http://web.usm.my/jcdc/vol17_1_2012/Art%20jcdc17-1.pdf
- Yuping, H., Shengqin, J., Liqian, Z., Qiao, C., Bianco, C. (2008). *Cooling System of Outdoor Cabinet using Underground Heat Pipe*. doi: [10.1109/INTLEC.2008.4664056](https://doi.org/10.1109/INTLEC.2008.4664056)

- Yuping, H., Shengqin, J., Yunhui, Z., Xiaoming, K., Qiao, C., Cucchietti, F., & Griffa, G. (2008,b). *Energy saving active cooling systems for outdoor cabinet. In Telecommunications Energy Conference*. doi: [10.1109/INTLEC.2008.4664063](https://doi.org/10.1109/INTLEC.2008.4664063)
- Yuping, H., Yuening, L., Shi J. (2009). *Geothermal cooling solution research for outdoor cabinet*. Retrieved from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5340071/?part=1>
- ZTE. (2017). High-capacity Multimode BBU ZXSDR B8300. Retrieved from http://www.zte.com.cn/en/products/wireless/lte/td_lte/201107/t20110726_351984.html