

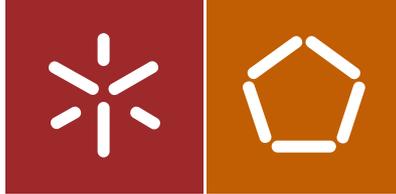


Élio de Castro Sousa

Aplicabilidade de sistemas de  
ventilação com permutador de  
calor ar-solo no clima português

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Élio de Castro Sousa

Aplicabilidade de sistemas de  
ventilação com permutador de  
calor ar-solo no clima português

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professor Doutor Ricardo Filipe Mesquita Silva Mateus  
Professora Doutora Sandra Monteiro Silva

Julho de 2014

***“(...) a sustainable development meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.” (Brundtland, 1987)***



## **Agradecimentos**

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação, que agora vejo concluída, não teria sido possível sem a colaboração e o apoio de um restrito número de pessoas. O término da minha dissertação representa a conclusão de um capítulo importante na minha evolução como pessoa. Por tal, dirijo os meus agradecimentos a todos os que me acompanharam ao longo desta jornada.

Não obstante, este trabalho só tem o seu devido valor graças ao apoio e à orientação do Professor Doutor Ricardo Mateus e da Professora Doutora Sandra Silva do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Ao Professor Ricardo Mateus, o meu orientador, quero expressar o meu profundo agradecimento pela amizade, dedicação, disponibilidade e sabedoria, bem como o seu forte incentivo, sempre presentes desde o início dos trabalhos.

À Professora Sandra Monteiro Silva, a minha coorientadora, agradeço pela sua disponibilidade e prontidão de resposta, pela paciência demonstrada e a sua orientação imprescindível no processo de aprendizagem de utilização das ferramentas informáticas utilizadas e no esclarecimento de dúvidas.

Quero agradecer de forma especial à minha mãe e ao meu irmão por terem sido um suporte fundamental, incondicional e imprescindível em todos os momentos. Agradeço a presença deles, o afeto incondicional e o ânimo transmitido para transformar os momentos mais difíceis em conquistas.

Agradeço ainda aos meus amigos Gabi, Inês, Paulo e Rita por me acompanharem ao longo dos últimos anos e darem um sentido especial a todos os momentos que partilhamos juntos.

Por último, mas não menos importante, o meu especial agradecimento para a Diana, o Escadas, a Susana, a Joana, a Catarina, a Ariana, o Jorge, o Rúben, o Filipe e o Ricardo por terem tornado a minha experiência académica em Guimarães memorável.



## Resumo

As exigências da sociedade moderna e os seus hábitos estão a transformar o planeta Terra, desgastando os seus recursos naturais e poluindo os solos, a água e a atmosfera. O elevado ritmo de consumo energético, especialmente no sector da construção, tem levado a um intenso estudo de desenvolvimento e à utilização de energias renováveis com o objetivo de reduzi-lo até um nível sustentável.

As Diretivas Comunitárias e a legislação portuguesa atualmente em vigor apontam para o aumento da eficiência energética dos edifícios, conseguindo-o através do aumento do isolamento térmico da envolvente, do melhoramento da estanquicidade ao ar dos envidraçados e da implementação de um mínimo horário de renovações do ar interior. No entanto, tem-se verificado que se com o aumento do isolamento da envolvente se conseguem reduzir os fluxos de calor entre o exterior e o interior, com a renovação de ar por hora aumenta-se as necessidades de aquecimento e por vezes de arrefecimento.

Neste contexto, a utilização conjunta de sistemas de ventilação convencionais e de permutadores de calor com tubos enterrados no solo, pode trazer benefícios na redução dos consumos energéticos das necessidades de aquecimento e arrefecimento. Nestes sistemas, o ar insuflado é pré-aquecido ou pré-arrefecido ao circular nos tubos, dependendo da temperatura do ar em relação ao solo. Estas diferenças de temperatura podem atingir valores durante os picos de calor ou de frio, suficientes para reduzir significativamente ou eliminar a necessidade de equipamentos de aquecimento e arrefecimento.

Tendo em conta que o referido sistema já foi alvo de variados estudos e é amplamente utilizado em vários países, pretende-se com este estudo a comparação direta entre os comportamentos térmicos de um edifício com e sem um sistema de tubos enterrados. Em adição, pretende-se estudar parametricamente a influência que os parâmetros de comprimento, diâmetro, profundidade e tipo de material dos tubos exercem na performance do sistema. Para isso, utilizar-se-á o programa de simulação energética “*EnergyPlus*” de modo a avaliar o desempenho da manutenção do conforto térmico num ambiente doméstico em várias zonas de Portugal.

**Palavras-Chave:** permutador de calor ar-solo, ventilação mecânica, eficiência energética, EnergyPlus.



## **Abstract**

The demands of modern society and its habits are changing the planet Earth, wearing out natural resources and polluting the soil, water and atmosphere. The high rate of energy consumption, especially in the construction sector, has led to an intense study, development and use of renewable energy in order to reduce it to a sustainable level.

The Community Policies and Portuguese legislation currently in effect lead to an improvement of buildings' energy efficiency, achieving it by increasing thermal insulation of the external envelope, improving the air tightness of the glazing and the implementation of a minimum legal value of interior air changes per hour. However, it has been found that if with increased thickness of the surrounding insulation the heat flow between the inside and the outside is reduced, the imposed air changes per hour increase the energy consumption for heating and cooling.

In this context, the joint use of conventional HVAC and earth-to-air heat exchanger systems can bring benefits in reducing energy consumption for heating and cooling. In these systems, the insufflated air is preheated or precooled, depending on the difference between the soil and air temperatures, when it flows through the buried pipes. These temperature difference can reach values, at the peaks of heat or cool, enough to significantly reduce or eliminate the need for heating and cooling equipment.

Considering that this system has been the subject of various studies and is widely used in various countries, the aim of this study is the direct comparison of the thermal behaviour of a building with and without the buried pipes' system. In addition, it is intended to perform a parametrical study which determines the system's performance influence of parameters such as length, diameter, depth and pipes' material. For this, the energy simulation program "EnergyPlus" shall be used, in order to evaluate the thermal performance of the earth-to-air heat exchanger system applied in a residential environment in several places of Portugal.

**Keywords:** earth-to-air heat exchanger systems, mechanical ventilation, energy efficiency, EnergyPlus.



## Índice

Agradecimentos .....	vii
Resumo .....	ix
Abstract.....	xi
Índice .....	xiii
Índice de Figuras .....	xvii
Índice de Tabelas .....	xxvii
Lista de Abreviaturas.....	xxxii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento temático .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização da Dissertação.....	3
2. Estado de Arte .....	5
2.1. Enquadramento Energético.....	5
2.2. Ventilação e o conforto térmico .....	10
2.3. Permutadores de calor ar-solo .....	12
2.4. Energia geotérmica de baixa profundidade .....	12
2.5. Princípios de funcionamento e tipos de sistemas .....	15
2.6. Vantagens e desvantagens da utilização de sistemas <i>EAHE</i> .....	17
2.7. Impacte ambiental.....	18
2.8. Estudo de casos de aplicação .....	19
2.8.1. Edifícios residenciais.....	19
2.8.2. Edifícios de serviços.....	21
2.8.3. Estufas .....	24
2.9. Investigação e desenvolvimento no domínio dos sistemas <i>EAHE</i> .....	25
2.10. Simulação energética - EnergyPlus .....	27
2.11. Metodologia seguida pelo <i>EnergyPlus</i> .....	28

---

2.12. <i>ZoneEarthTube</i> e <i>CalcSoilSurfTemp</i> .....	33
3. Metodologias .....	39
3.1. Metodologia do Estudo Paramétrico .....	39
3.1.1. Enquadramento.....	39
3.1.2. Descrição da célula de teste .....	40
3.1.2.1. Definição das soluções construtivas.....	41
3.1.2.2. Definição do sistema de climatização .....	43
3.1.2.3. Definição dos parâmetros climáticos .....	47
3.1.2.4. Definição do tipo de solo .....	48
3.1.2.5. Definição do sistema de permutador de calor ar-solo.....	50
3.1.3. Descrição dos parâmetros estudados.....	52
3.2. Metodologia do caso de estudo - <i>Wee Building</i> .....	53
3.2.1. Enquadramento.....	53
3.2.2. Descrição do edifício em estudo .....	53
3.2.2.1. Definição da arquitetura.....	53
3.2.2.2. Definição das soluções construtivas.....	55
3.2.2.3. Definição do sistema de climatização .....	59
3.2.2.4. Definição dos parâmetros climáticos e do tipo de solo.....	59
3.2.2.5. Definição do sistema de permutador de calor ar-solo.....	65
3.2.2.6. Definição dos ganhos internos .....	68
3.3. Metodologia da análise económica.....	72
3.3.1. Enquadramento.....	72
3.3.2. Análise de custos de ciclo de vida.....	73
3.3.3. Síntese de análise económica .....	75
4. Resultados.....	79
4.1. Resultados do Estudo Paramétrico .....	79
4.1.1. Variação do comprimento .....	81

4.1.1.1. Tubo de Betão .....	81
4.1.1.2. Tubo de Aço Inox.....	87
4.1.1.3. Tubo de PVC.....	90
4.1.1.4. Comparação dos resultados obtidos com os diferentes tipos de tubos .	92
4.1.2. Variação do diâmetro .....	95
4.1.2.1. Tubo de Betão .....	96
4.1.2.2. Tubo de Aço Inox.....	102
4.1.2.3. Tubo de PVC.....	105
4.1.2.4. Comparação dos resultados obtidos com os diferentes tipos de tubos	108
4.1.3. Variação da profundidade .....	111
4.1.3.1. Tubo de Betão .....	111
4.1.3.2. Tubo de Aço Inox.....	118
4.1.3.3. Tubo de PVC.....	121
4.1.3.4. Comparação dos resultados obtidos com os diferentes tipos de tubos	124
4.2. Resultados do caso de estudo - <i>Wee Building</i> .....	128
4.2.1. Resultados das simulações energéticas para Bragança .....	129
4.2.2. Resultados das simulações energéticas para Évora.....	130
4.2.3. Resultados das simulações energéticas para Lisboa .....	132
4.2.4. Resultados das simulações energéticas para o Porto.....	133
4.3. Resultados da análise económica.....	135
4.3.1. Resultados da análise de custos de ciclo de vida .....	135
4.3.2. Resultados da análise económica .....	136
4.3.2.1. Tempo de retorno do investimento no sistema - Bragança.....	138
4.3.2.2. Tempo de retorno do investimento no sistema - Évora.....	140
4.3.2.3. Tempo de retorno do investimento no sistema - Lisboa .....	141
4.3.2.4. Tempo de retorno do investimento no sistema - Porto .....	143
5. Considerações Finais .....	145

5.1. Conclusões Finais .....	145
5.2. Desenvolvimentos futuros .....	149
6. Referências Bibliográficas .....	151
7. Anexos .....	157

## Índice de Figuras

Figura 1 - Fontes de energia utilizadas pelo Homem ao longo dos tempos (Cahen & Lubomirsky, 2008) .....	5
Figura 2 - Mix energético português em 2010 (ADENE, 2012) .....	7
Figura 3 - Exemplo de um abrigo pré-histórico improvisado (CSU, 2013).....	10
Figura 4 - Efeito de chaminé na ventilação natural (HHSM, 2014).....	11
Figura 5 – Registo da temperatura diária do ar e do solo na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro, no decorrer do ano de 2005 (Monteiro, 2008).....	13
Figura 6 – Esquema ilustrativo do funcionamento do sistema EAHE (TAES, 2013).....	15
Figura 7 – Esquema exemplificativo de um sistema aberto de um EAHE (Ozgener, 2011) ...	16
Figura 8 – Exemplos de várias soluções construtivas para sistemas EAHE fechados (adaptada de Florides & Kalogirou, 2007).....	17
Figura 9 – Exemplo de uma moradia da urbanização AlmaVerde.....	19
Figura 10 – Imagem ilustrativa do sistema Coolhouse.....	19
Figura 11 – Vista geral da moradia Oásis a partir da fachada Este .....	20
Figura 12 – Arquitetura bioclimática e sistemas passivos utilizados no Aldo Leopold Legacy Center (Arch Daily, 2013).....	22
Figura 13 – Exemplo esquemático do funcionamento e da disposição em planta do permutador de calor ar-solo utilizado no Edifício Solar XXI (adaptada de LNEG, 2013).....	23
Figura 14 – Esquema ilustrativo das soluções bioclimáticas aplicadas no One Angel Square Building (HEVAR, 2013).....	23
Figura 15 – Esquema exemplificativo da estufa construída por Girja Sharan .....	25
Figura 16 – Imagem exemplificativa do interface gráfico do EnergyPlus .....	29

Figura 17 – Imagem exemplificativa da definição de superfícies equivalentes .....	32
Figura 18 – Imagem exemplificativa da introdução de materiais no EnergyPlus .....	33
Figura 19 – Imagem exemplificativa da introdução de ganhos internos no EnergyPlus .....	33
Figura 20 – Interface de modelação do ZoneEarthtube no EnergyPlus .....	37
Figura 21 – Modelo da célula de teste, em vista isométrica, desenhado no Google SketchUp	41
Figura 22 – Esquema exemplificativo do funcionamento de uma máquina frigorífica (Reabilitação e Manutenção de Edifícios, 2013).....	45
Figura 23 – Imagem exemplificativa de um aquecedor elétrico de rodapé (HAP, 2013) .....	45
Figura 24 – Esquema exemplificativo da colocação de um aquecedor elétrico de rodapé (SRM, 2013).....	46
Figura 25 – Variação da temperatura do ar exterior no dia 2 de Janeiro.....	47
Figura 26 – Variação da temperatura do ar exterior no dia 10 de Agosto.....	48
Figura 27 – Variação da temperatura do ar exterior e do solo na cidade do Porto.....	48
Figura 28 – Perspetiva isométrica do Wee Building no software Google SketchUp.....	54
Figura 29 – Planta do Rés-do-Chão do Wee Building no software Google SketchUp.....	54
Figura 30 – Planta do Piso 1 do Wee Building no software Google SketchUp .....	55
Figura 31 - Variação da temperatura média mensal do ar exterior e do solo na cidade de Bragança .....	60
Figura 32 - Variação da temperatura do ar exterior e do solo na cidade de Évora.....	61
Figura 33 - Variação da temperatura do ar exterior e do solo na cidade de Lisboa .....	63
Figura 34 - Variação da temperatura do ar exterior e do solo na cidade do Porto .....	64
Figura 35 – Esquema de funcionamento exemplificativo do sistema EAHE considerado na análise de custos .....	74

Figura 36 - Diagrama de fluxos monetários cumulativos típico de um projeto (Romero, 2013) .....	76
Figura 37 - Variação do consumo de energia para aquecimento da solução base no dia 2 de Janeiro.....	79
Figura 38 – Variação do consumo de energia para arrefecimento da solução base no dia 10 de Agosto.....	80
Figura 39 - Variação mensal do consumo de energia elétrica para aquecimento e arrefecimento da solução base .....	80
Figura 40 – Variação de consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro consoante o comprimento do tubo enterrado.....	82
Figura 41 – Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação de comprimento do tubo.....	82
Figura 42 – Variação do consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto consoante o comprimento do tubo enterrado.....	83
Figura 43 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação de comprimento.....	84
Figura 44 – Variação mensal dos consumos de energia para aquecimento consoante o comprimento do tubo enterrado.....	84
Figura 45 – Diferença de consumos energéticos anuais de aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado, consoante a variação de comprimento do tubo .....	85
Figura 46 – Variação mensal dos consumos de energia para arrefecimento consoante o comprimento do tubo enterrado.....	86
Figura 47 – Diferença de consumos energéticos anuais de arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado, consoante a variação de comprimento do tubo .....	86

Figura 48 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação de comprimento do tubo.....	87
Figura 49 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação de comprimento do tubo.....	88
Figura 50 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado, consoante a variação de comprimento do tubo .....	89
Figura 51 – Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados, consoante a variação de comprimento .....	89
Figura 52 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados no dia 2 de Janeiro, consoante a variação de comprimento do tubo.....	90
Figura 53 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados no dia 10 de Agosto, consoante a variação de comprimento do tubo.....	91
Figura 54 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados, consoante a variação do comprimento do tubo.....	91
Figura 55 - Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados, consoante a variação de comprimento .....	92
Figura 56 – Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para aquecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC.....	93
Figura 57 – Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para arrefecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC.....	94
Figura 58 - Variação do consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, consoante o diâmetro do tubo enterrado.....	96

Figura 59 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação do diâmetro .....	97
Figura 60 - Variação do consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, consoante o diâmetro do tubo enterrado.....	98
Figura 61 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação do diâmetro do tubo .....	98
Figura 62 - Variação mensal do consumo de energia para aquecimento, consoante o diâmetro do tubo enterrado .....	99
Figura 63 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados, consoante a variação do diâmetro do tubo.....	100
Figura 64 - Variação mensal do consumo de energia para arrefecimento, consoante o diâmetro do tubo enterrado .....	101
Figura 65 - Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados, consoante a variação do diâmetro do tubo.....	102
Figura 66 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação do diâmetro do tubo .....	103
Figura 67 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante o diâmetro do tubo .....	103
Figura 68 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrados, consoante o diâmetro do tubo.....	104
Figura 69 - Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante o diâmetro do tubo .....	105
Figura 70 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação do diâmetro do tubo	106

Figura 71 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação do diâmetro do tubo .....	106
Figura 72 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante o diâmetro do tubo enterrado .....	107
Figura 73 - Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante o diâmetro do tubo .....	108
Figura 74 - Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para aquecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC.....	109
Figura 75 - Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para arrefecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC.....	110
Figura 76 - Variação do consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, consoante a profundidade do tubo enterrado .....	112
Figura 77 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação da profundidade do tubo .....	113
Figura 78 - Variação do consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, consoante a profundidade do tubo enterrado .....	114
Figura 79 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação da profundidade do tubo .....	114
Figura 80 – Variação mensal dos consumos de energia para aquecimento consoante a profundidade do tubo enterrado.....	115
Figura 81 – Diferença de consumos energéticos anuais de aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo .....	116
Figura 82 – Variação mensal dos consumos de energia para arrefecimento consoante a variação da profundidade do tubo enterrado .....	117

Figura 83 – Diferença de consumos energéticos anuais de arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo enterrado .....	118
Figura 84 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação da profundidade do tubo .....	119
Figura 85 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação da profundidade do tubo .....	119
Figura 86 - Diferença de consumos energéticos anuais de aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo .....	120
Figura 87 - Diferença de consumos energéticos anuais de arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo .....	121
Figura 88 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com tubos enterrados no dia 2 de Janeiro, consoante a variação da profundidade do tubo .....	122
Figura 89 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação da profundidade do solo .....	122
Figura 90 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo .....	123
Figura 91 - Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo enterrado .....	124
Figura 92 - Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para aquecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC .....	125
Figura 93 - Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para arrefecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC .....	127

Figura 94 - Consumos de energia das soluções base e híbrida do Wee Building na cidade de Bragança.....	129
Figura 95 - Consumos de energia das soluções base e híbrida do Wee Building na cidade de Évora.....	131
Figura 96 - Consumos de energia das soluções base e híbrida do Wee Building na cidade de Lisboa.....	132
Figura 97 - Consumos de energia das soluções base e híbrida do Wee Building na cidade do Porto.....	134
Figura 98 – Linha de retorno do investimento no equipamento instalado em Bragança.....	139
Figura 99 – Linha de retorno do investimento no equipamento instalado em Évora.....	141
Figura 100 – Linha de retorno do investimento no equipamento instalado em Lisboa.....	143
Figura 101 – Linha de retorno do investimento no equipamento instalado no Porto.....	144
Figura 102 - Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação do comprimento do tubo de aço inox.....	157
Figura 103 - Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação do comprimento do tubo de aço inox.....	157
Figura 104 – Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação do comprimento do tubo de aço inox.....	158
Figura 105 – Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação do comprimento do tubo de aço inox.....	158
Figura 106 – Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação do comprimento do tubo de PVC.....	159
Figura 107 - Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação do comprimento do tubo de PVC.....	159

Figura 108 - Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação do comprimento do tubo de PVC .....	160
Figura 109 - Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação do comprimento do tubo de PVC .....	160
Figura 110 - Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de aço inox .....	161
Figura 111 – Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de aço inox .....	161
Figura 112 – Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de aço inox .....	162
Figura 113 – Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de aço inox .....	162
Figura 114 – Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de PVC.....	163
Figura 115 – Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de PVC.....	163
Figura 116 – Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de PVC .....	164
Figura 117 – Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de PVC .....	164
Figura 118 - Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação da profundidade do tubo de aço inox .....	165
Figura 119 - Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação da profundidade do tubo de aço inox .....	165
Figura 120 - Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação da profundidade do tubo de aço inox .....	166

Figura 121 - Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação da profundidade do tubo de aço inox ..... 166

Figura 122 - Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação da profundidade do tubo de PVC..... 167

Figura 123 - Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação da profundidade do tubo de PVC..... 167

Figura 124 - Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação da profundidade do tubo de PVC ..... 168

Figura 125 - Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação da profundidade do tubo de PVC ..... 168

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Tipos de superfícies e respetiva categorização .....	31
Tabela 2 – Condições do solo em profundidade e à superfície .....	35
Tabela 3 – Soluções construtivas adotadas para a célula de teste .....	42
Tabela 4 – Solução construtiva dos envidraçados adotada para a célula de teste .....	43
Tabela 5 – Variação das temperaturas médias mensais do ar exterior e do solo na cidade do Porto .....	49
Tabela 6 – Características físicas dos tubos enterrados.....	50
Tabela 7 – Esquema de funcionamento do permutador de calor ar-solo.....	51
Tabela 8 - Materiais e respetivas características físicas dos materiais construtivos do Wee Building .....	56
Tabela 9 - Descrição das soluções construtivas por materiais.....	57
Tabela 10 – Características físicas dos envidraçados utilizados no Wee Building .....	57
Tabela 11 - Características físicas dos dispositivos de sombreamento dos envidraçados utilizados no Wee Building .....	58
Tabela 12 - Variação das temperaturas do ar exterior e do solo na cidade de Bragança .....	60
Tabela 13 - Variação das temperaturas do ar exterior e do solo na cidade de Évora .....	62
Tabela 14 - Variação das temperaturas do ar exterior e do solo na cidade de Lisboa.....	63
Tabela 15 - Variação das temperaturas do ar exterior e do solo na cidade do Porto.....	65
Tabela 16 – Características físicas do sistema de permutador de calor ar-solo .....	66
Tabela 17 – Esquema de funcionamento do permutador de calor ar-solo.....	68
Tabela 18 – Ganhos internos consoante a atividade humana .....	69

Tabela 19 – Agendamento dos ganhos internos devidos à atividade humana.....	69
Tabela 20 – Níveis de iluminação por divisão apontados pela norma ASHRAE 90.1-2010 ...	70
Tabela 21 – Agendamento dos ganhos internos devidos à iluminação interior .....	70
Tabela 22 – Valores de potência considerados para os equipamentos elétricos .....	71
Tabela 23 – Agendamento dos ganhos internos devidos à utilização de equipamentos elétricos .....	72
Tabela 24 - Poupança nos consumos energéticos para aquecimento em função do tipo de material e do comprimento do tubo enterrado.....	94
Tabela 25 - Poupança nos consumos energéticos para arrefecimento em função do tipo de material e do comprimento do tubo enterrado.....	95
Tabela 26 - Poupança nos consumos energéticos para aquecimento em função do tipo de material e do diâmetro do tubo enterrado .....	109
Tabela 27 - Poupança nos consumos energéticos para arrefecimento em função do tipo de material e do diâmetro do tubo enterrado .....	111
Tabela 28 - Poupança nos consumos energéticos para aquecimento em função do tipo de material e da profundidade do tubo enterrado .....	126
Tabela 29 - Poupança nos consumos energéticos para arrefecimento em função do tipo de material e da profundidade do tubo enterrado .....	127
Tabela 30 - Localizações adotadas para aplicação do caso de estudo.....	128
Tabela 31 – Poupanças de energia atingidas para a cidade de Bragança .....	130
Tabela 32 – Poupanças de energia atingidas para a cidade de Évora.....	131
Tabela 33 – Poupanças de energia atingidas para a cidade de Lisboa .....	133
Tabela 34 – Poupanças de energia atingidas para a cidade do Porto .....	134
Tabela 35 – Custos orçamentais da instalação do sistema EAHE.....	136

Tabela 36 - Estimativa da evolução dos preços da eletricidade em 60 anos .....	137
Tabela 37 – Contabilização dos custos energéticos anuais para a cidade de Bragança .....	138
Tabela 38 – Tempo de retorno do investimento no equipamento em Bragança .....	139
Tabela 39 – Contabilização dos custos energéticos anuais para a cidade de Évora.....	140
Tabela 40 – Tempo de retorno do investimento no equipamento em Évora.....	140
Tabela 41 – Contabilização dos custos energéticos anuais para a cidade de Lisboa.....	141
Tabela 42 – Tempo de retorno do investimento no equipamento em Lisboa.....	142
Tabela 43 – Contabilização dos custos energéticos anuais para a cidade do Porto.....	143
Tabela 44 – Tempo de retorno do investimento no equipamento no Porto.....	144



## **Lista de Abreviaturas**

- ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
- CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono
- DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia
- EAHE – Earth-to-Air Heat Exchangers (permutadores de calor ar-solo)
- EPS – Poliestireno expandido moldado
- GEE – Gases de Efeito de Estufa
- HVAC – Heating, Ventilation and Air Conditioning (AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado)
- RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
- XPS – Poliestireno expandido extrudido



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento temático

No decorrer das últimas décadas a aplicação de permutadores de calor ar-solo tornou-se um interessante objeto de estudo, devido maioritariamente aos benefícios proporcionados na poupança de energia, à sua simplicidade de montagem e custos de instalação e utilização relativamente reduzidos. O desenvolvimento no domínio dos sistemas *Earth-to-Air Heat Exchange* - *EAHE* (permutador de calor ar-solo) tem sofrido bastantes avanços ao longo dos últimos anos, fruto do muito trabalho de investigação efetuado pelos mais variados especialistas. É também de salientar a quantidade de sistemas instalados atualmente e a sua distribuição geográfica, visto não estar apenas confinada a países com climas extremos em termos de temperatura, aparecendo também em zonas climáticas mais moderadas. Outro aspeto interessante acerca deste tipo de sistemas é a facilidade de instalação e a adaptabilidade verificada perante os mais variados tipos de edifícios, havendo exemplos de aplicação recentes em edifícios residenciais, de serviços e ainda em outras tipologias como estufas ou pocilgas. Além disso, com a crescente procura deste tipo de sistemas prevê-se que esta tecnologia tenha ainda potencial para sofrer melhorias significativas num futuro próximo.

No entanto, embora já haja uma quantidade de informação assinalável, este tipo de sistemas ainda não é utilizado em grande escala devido ao reduzido número de ferramentas informáticas que analisem o comportamento dos *EAHE* nos mais variados contextos reais e permitam avaliar as suas viabilidades económica e técnica de uma forma relativamente acessível. O tamanho, o número de tubos enterrados e a sua disposição no terreno são fatores que estão, por norma, condicionados por questões orçamentais e de espaço. Torna-se então necessário ter conhecimento sobre o manuseamento de programas informáticos de simulação energética para que, de uma forma simples e rápida, se avalie não só o desempenho energético do sistema, como também a quantidade de energia que o edifício pode poupar se a este for aplicado o sistema em estudo.

Parâmetros como o comprimento, o material e a profundidade dos tubos enterrados, diferentes velocidades de circulação do ar e as características do solo onde serão inserido têm sido alvo de estudo. Estes estudos têm, normalmente, o objetivo de maximizar as trocas de calor ar-solo e a performance geral de todo o sistema para climas extremos. No caso de Portugal, caracterizado por um clima ameno, não existem ainda estudos que comprovem a aplicabilidade dos sistemas

*EAHE* nem os benefícios que advêm da sua aplicação. A utilização deste tipo de sistemas no clima português pode ser relativamente vantajoso, não só pelo contributo para melhorar a eficiência energética e sustentabilidade do parque edificado, como também pela redução do consumo de combustíveis fósseis aquando do processo de climatização dos edifícios.

Para que os sistemas de permutador de calor ar-solo tenham uma maior aceitação no mercado português e um desempenho adequado no clima em que se inserem, torna-se portanto necessário comprovar os benefícios da sua utilização.

Por fim, refere-se que este estudo foi desenvolvido tendo em consideração o Decreto-Lei nº. 80/2006 (RCCTE), visto que aquando do início do desenvolvimento deste trabalho ainda não existiam informações referentes à sua reformulação, publicada já no decorrer do ano de 2014. Assim, todos os resultados e metodologias considerados neste estudo devem ser analisados de acordo com esta ressalva.

## **1.2. Objetivos**

Este estudo tem como objetivo avaliar a aplicabilidade de sistemas de ventilação com permutador de calor ar-solo no clima português e comparar os resultados dos consumos energéticos com um sistema convencional de climatização. Para tal, vai-se definir uma metodologia de avaliação que permita analisar o desempenho energético dos sistemas de climatização considerados no programa informático “*EnergyPlus*”.

Após a modelação e a análise do desempenho energético do sistema de climatização convencional aplicado numa célula de teste, irá proceder-se ao dimensionamento de um sistema de permutador de calor ar-solo e respetiva integração no sistema de climatização convencional. De seguida, vai-se submeter o sistema híbrido a diversas simulações energéticas, com o objetivo de realizar um estudo paramétrico e avaliar a influência que o comprimento, o diâmetro, a profundidade e o material do tubo enterrado tem no desempenho do sistema. Desta forma poder-se-á determinar como o desempenho energético do sistema híbrido pode ser maximizado perante um clima ameno como o português. Terminado o estudo paramétrico, serão analisados os resultados dos parâmetros avaliados e irão apresentar-se os valores relativos às poupanças de energia para cada configuração estudada, com base na comparação entre o sistema de climatização convencional e o sistema híbrido.

Avaliada a influência que cada parâmetro exerce sobre o desempenho do sistema *EAHE*, outro objetivo consiste na aplicação dos conhecimentos adquiridos a um caso de estudo. Será então modelado um edifício com um sistema de climatização convencional (sistema base) e com um sistema híbrido, a aplicar em várias localizações de Portugal. Assim, pretende-se identificar a poupança de energia obtida por comparação entre o sistema convencional e o híbrido para as localidades assinaladas.

Por último, será também efetuado um estudo de avaliação da relação custo-benefício associada a cada localização estudada. Este último estudo tem como objetivo simular os valores de aquisição do sistema dimensionado para o caso de estudo e avaliar a amortização do equipamento, ou seja, é uma síntese de análise económica.

### **1.3. Organização da Dissertação**

O trabalho ao longo desta dissertação encontra-se organizado em cinco capítulos distintos. No capítulo 1 (Introdução) é feito o enquadramento ao tema, abordando as potencialidades proporcionadas pelos sistemas de ventilação com tubos enterrados no solo. Além disso, são também apresentados os objetivos do trabalho, bem como uma breve descrição do conteúdo e da organização da dissertação.

O capítulo 2 (Estado de Arte) complementa as potencialidades dos sistemas *EAHE* abordadas anteriormente. Para tal, é previamente realizado um enquadramento energético da atualidade e da evolução das condições de ventilação e conforto térmico dos edifícios ao longo do tempo. De seguida, são explicados pormenorizadamente os princípios de funcionamento, diversos tipos de sistemas existentes, vantagens e desvantagens de utilização, o impacte ambiental e alguns exemplos de casos de aplicação de sistemas *EAHE* em diversos tipos de edifícios. Por último, é apresentada uma revisão bibliográfica no domínio dos referidos sistemas e das simulações energéticas no *software* “*EnergyPlus*”.

As metodologias consideradas para a realização do estudo paramétrico, do caso de estudo e da síntese de análise económica são abordadas no capítulo 3 (Metodologias).

Relativamente ao capítulo 4 (Resultados), é aquele em que são apresentados os resultados finais obtidos para os diversos parâmetros analisados no estudo paramétrico, bem como as respetivas poupanças de energia associadas, os resultados das poupanças obtidas para o caso de estudo nas

diferentes localidades e, por último, são também apresentados os resultados da síntese de análise económica.

No último capítulo (Considerações Finais) apresentam-se as principais conclusões deste trabalho e algumas sugestões de estudos a realizar no futuro, para que seja dada continuidade ao tema desenvolvido na presente dissertação.

## 2. Estado de Arte

### 2.1. Enquadramento Energético

Olhando para a crise energética a nível mundial, sem menosprezar a importância da energia para a existência da nossa sociedade, torna-se imperativo e urgente descobrir fontes de energia alternativas para substituir o combustível convencional ou pelo menos mitigar o seu consumo globalizado e o conseqüente impacto no meio ambiente (Mathur *et al.*, 2012). Ao longo dos vários séculos da sua existência, o Homem foi-se desenvolvendo recorrendo não só a materiais (pedra, bronze, ferro e madeira), como também aos tipos de energia que dispunha em cada altura. Como se pode analisar através do gráfico da Figura 1, a substituição gradual da energia da biomassa pelos combustíveis fósseis e energia nuclear acompanhou o desenvolvimento do Homem até à sociedade atual. Cada nova fonte de energia introduzida proporcionou a descoberta de novos materiais e a redescoberta de propriedades e aplicações para os materiais já conhecidos. Esta evolução revolucionou o estilo de vida da sociedade moderna: melhorou a qualidade de vida, serviu de base para o crescimento populacional e aumentou drasticamente os ritmos de consumo, pondo em causa o equilíbrio entre o desenvolvimento socioeconómico e o meio ambiente.

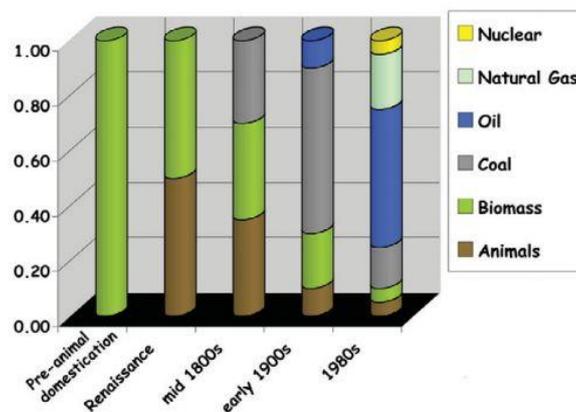


Figura 1 - Fontes de energia utilizadas pelo Homem ao longo dos tempos (Cahen & Lubomirsky, 2008)

A principal consequência negativa da utilização dos combustíveis fósseis é o chamado efeito de estufa. Este efeito consiste no processo fotoquímico natural responsável pela regulação da temperatura à superfície da Terra. O sol emite a radiação infravermelha que entra na atmosfera sendo que parte dessa radiação é absorvida pela superfície terrestre e outra parte é refletida de volta para a atmosfera, podendo ser encaminhada de volta para o espaço ou ser retida na atmosfera através da ação de um filtro criado pelos chamados gases de efeito de estufa - GEE

(dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, metano CH<sub>4</sub>, óxido nitroso N<sub>2</sub>O e os clorofluorcarbonetos, entre outros). É devido a este processo natural que o planeta mantém em equilíbrio a temperatura amena essencial à existência das formas mais variadas de vida. No entanto, através da utilização dos combustíveis fósseis nas mais diversas atividades diárias (o uso de veículos motorizados, o aquecimento e arrefecimento dos edifícios, o consumo de energia elétrica e a atividade industrial), a concentração dos GEE está a aumentar consideravelmente e o equilíbrio natural referido anteriormente está a ser destabilizado devido à maior retenção de radiação solar, o que origina um aumento artificial da temperatura. As consequências deste desequilíbrio são o referido aumento da temperatura superficial da Terra, o aumento da desertificação, a diminuição da quantidade de gelo acumulado nas zonas polares e subpolares e consequente aumento do nível médio das águas do mar e uma maior ocorrência de intempéries e cheias, entre outros (Ramanathan & Feng, 2008).

Prevê-se que no ano de 2030 o consumo mundial de energia cresça cerca de dois terços comparativamente ao atual, com os países em vias de desenvolvimento a superarem os desenvolvidos no grupo dos maiores consumidores (Dorian *et al.*, 2005). Esta previsão aponta unicamente para o consumo de combustíveis fósseis e, tendo em consideração as consequências que a utilização deste tipo de combustíveis tem na degradação do meio ambiente, torna-se então importante tomar medidas que apoiem a redução do seu consumo. Por outro lado, ao reduzir a quantidade de combustíveis fósseis consumidos, os países que não os possuem reduzem a sua dependência externa de fornecimento e tornam-se menos vulneráveis à volatilidade e instabilidade dos preços, o que por si só, ajuda a agilizar e estabilizar a economia interna e a aumentar a competitividade económica.

Segundo o Guia da Eficiência Energética, publicado pela ADENE em 2012, a dependência externa de energia de Portugal em 2010 atingiu os 77%, sendo que a percentagem de produção interna de 33% foi obtida através das energias hídrica e eólica. Não obstante a produção de três vezes mais energia renovável comparativamente ao ano de 1990, convém salientar que a importação de energia elétrica aumentou 71 vezes no mesmo intervalo de comparação. A contribuir para esta subida na necessidade de energia elétrica está o sector residencial português, responsável por cerca de 30% do consumo de eletricidade. As causas apontadas para o referido aumento são o crescimento da aquisição de equipamentos domésticos, a ineficiência energética de alguns desses equipamentos e os padrões comportamentais errados dos consumidores aquando da sua utilização.

A mesma publicação refere que o consumo de energia primária apresentou um crescimento médio de 2,3% ao ano desde 1990. A principal fonte de energia para consumo energético em Portugal é o petróleo e os seus derivados, representando aproximadamente 70%, como se pode comprovar no gráfico da Figura 2.

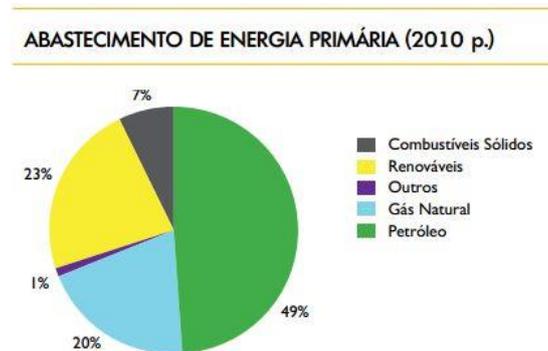


Figura 2 - *Mix* energético português em 2010 (ADENE, 2012)

Um dos grandes desafios que o Homem enfrenta atualmente consiste na alteração do chamado “*mix* energético”, designação utilizada para referir todas as fontes de energia utilizadas para produzir energia elétrica. Este desafio é encontrar um *mix* energético que permitirá os tipos de estilos de vida que a sociedade está habituada (Cahen & Lubomirsky, 2008) conciliando dois aspetos tidos como ambíguos: substituir gradualmente o consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis por energias renováveis, ambientalmente mais sustentáveis, sem criar efeitos adversos na economia global. Então, no decorrer dos próximos anos, a sociedade atual será confrontada com desafios energéticos que irão requerer iniciativas significativas por parte dos governos e do sector das indústrias. Esses desafios incluem o acentuar da escassez de petróleo, a obtenção de energia segura, o combate à degradação ambiental e o conhecimento das necessidades de um mundo em desenvolvimento (Dorian *et al.*, 2005).

O primeiro grande aviso à escala global sobre a insustentabilidade do nosso paradigma de consumo foi dado pelo Relatório de Brundtland em 1987. Este relatório foi elaborado pela primeira-ministra norueguesa Gro Harlem Brundtland para a *World Commission on Environment and Development* a pedido da Organização das Nações Unidas e constituiu uma visão crítica sobre o modelo de desenvolvimento adotado pelos países desenvolvidos e reproduzido pelos países em vias de desenvolvimento, modelo esse que procede ao uso excessivo de recursos naturais sem respeitar a capacidade de reposição natural dos ecossistemas. Desta forma, a sociedade atual dirige-se para uma situação de insustentabilidade entre os padrões de produção e de consumo de recursos naturais (Brundtland, 1987). Para inverter a situação foram apontadas

algumas medidas a implementar pelos governos para promover um desenvolvimento sustentável, sendo as mais importantes:

- Preservação da biodiversidade e dos ecossistemas;
- Garantia de existência de água, alimentos e energia a longo prazo;
- Diminuição dos consumos energéticos através da implementação de tecnologias de energias renováveis;
- Aumento da produção industrial dos países em vias de desenvolvimento recorrendo a tecnologias ecológicas;
- Controlo da urbanização desorganizada;
- Reciclagem de materiais reaproveitáveis;
- Proteção dos ecossistemas a nível global e não apenas local.

Em 1997 foi elaborado o chamado Protocolo de Quioto, no decorrer de uma iniciativa da *United Nations Framework Convention on Climate Change*, com o objetivo de estabelecer uma redução das emissões de dióxido de carbono (principal causador do efeito de estufa e maioritariamente emitido pelos países mais desenvolvidos) em aproximadamente 5% até ao ano de 2012. O Protocolo de Quioto é considerado o esforço internacional mais significativo alguma vez tomado para minimizar os efeitos do aquecimento global e as alterações climáticas, possuindo um papel fundamental na determinação das obrigações para a redução de emissões de CO<sub>2</sub> e dos mecanismos a aplicar (Gençay & Goşkun, 2011). Este estimula os países a reduzir a produção de dióxido de carbono através de duas medidas importantes: a primeira aponta para a produção mais eficiente de energia elétrica, com o recurso à produção de eletricidade através de energias renováveis e a segunda para a maximização do uso da energia nos processos de produção, edifícios, etc. reduzindo o consumo de eletricidade e de energia primária (De Paepe & Janssens, 2002). Apesar da sua importância, este protocolo só entrou em vigor no ano de 2005 aquando da ratificação da Rússia, isto porque a ratificação de um certo número de países exigia algumas especificidades para que o protocolo fosse exequível. Por outras palavras, o protocolo teria de ser ratificado por 55 países, os quais teriam de ser responsáveis por, pelo menos, 55% das emissões emitidas no ano de 1990 (Çamur & Vaizoğlu, 2007) e inicialmente apenas 36 países ratificaram o protocolo. Ao ratificar o Protocolo de Quioto, Portugal comprometeu-se a reduzir a energia primária total anual em 20% comparativamente ao ano de 1990, a aumentar o recurso a energias renováveis até atingir uma cota de 31% do *mix* energético nacional e a incorporação de 20% de biocombustíveis nos carburantes até 2020 (ADENE, 2012).

A União Europeia promulgou, a 16 de Dezembro de 2002, a Diretiva 2002/91/CE relativa ao desempenho energético dos edifícios, promovendo desta forma a criação de uma série de políticas a implementar, dentro do espaço comunitário, com o objetivo de alcançar maiores sustentabilidades energética e ambiental dos edifícios e reduzir a dependência externa a médio e longo prazos. Esta promulgação foi adotada na sequência de estudos que quantificavam os consumos dos edifícios europeus em cerca de 40% da energia primária total (30% no caso de Portugal), valor com tendência para aumentar, nos quais há um potencial de poupança com viabilidade económica na ordem dos 22%. Não obstante, estima-se ainda que o desperdício de energia no sector dos edifícios ronde os 1000 milhões de euros por ano. Para inverter esta situação, esta Diretiva impôs requisitos térmicos mínimos para os edifícios novos e todas as reabilitações importantes de edifícios com área útil superior a 1000 m<sup>2</sup>, introduziu a obrigatoriedade da certificação energética dos edifícios e de auditorias periódicas a caldeiras e sistemas de climatização acima de determinados valores de potência instalada, bem como a qualificação profissional adequada de técnicos capazes de certificar e inspecionar os edifícios. Esta diretiva foi transposta para o quadro legal português através dos Decretos-Lei n.º. 78/2006 – Certificação Energética de Edifícios, n.º. 79/2006 – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios e n.º. 80/2006 – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios.

Posteriormente, foram publicadas outras Diretivas com linhas de ação semelhantes à supracitada e com o objetivo de regular e aumentar a sustentabilidade dos edifícios em aspetos como, por exemplo, a qualidade do ar no interior dos edifícios, o conforto acústico, a qualidade ambiental dos materiais e a análise do custo do ciclo de vida dos edifícios. Um desses exemplos é a reformulação da Diretiva 2002/91/CE, a Diretiva 2010/31/CE, também designada por “*EPBD recast*” publicada em 2010 e que implementa, pela primeira vez, a utilização obrigatória de fontes de energia renováveis que supram as necessidades energéticas dos edifícios. Este facto constitui um primeiro passo para mudar o paradigma atual em direção aos *NZEB's* - sigla anglo-saxónica utilizada para designar os Nearly Zero-Energy Buildings, Edifícios com Consumos Energéticos Quase Nulos. A transposição para o quadro legal português ocorreu durante o ano 2013 e resultou no Decreto-Lei 118/2013, que consiste na versão revista e atualizada do RCCTE e foi publicada no início de 2014.

## 2.2. Ventilação e o conforto térmico

A sociedade moderna dos países desenvolvidos está habituada a níveis de conforto relativamente elevados e, hoje em dia, é quase inadmissível que os edifícios não apresentem condições mínimas de conforto térmico e acústico, de qualidade do ar e de humidade interior. No entanto, os nossos antepassados pré-históricos foram forçados a viver em grutas e abrigos improvisados sem qualquer tipo de conforto – Figura 3. Com o evoluir das técnicas construtivas utilizadas foram sendo introduzidos os primeiros blocos de argamassa seca ao sol, blocos de pedra, o cimento e mais tarde o betão armado. O Homem foi assim conquistando o nível de conforto que hoje é convencional.



Figura 3 - Exemplo de um abrigo pré-histórico improvisado (CSU, 2013)

Tanto num passado relativamente recente, como ainda atualmente, em Portugal é considerada como prática convencional construir edifícios com estrutura em betão armado, coberturas inclinadas de betão armado revestidas por telhas cerâmicas, paredes em alvenarias de tijolo vazado furado, reboco de cimento nas paredes e tetos e isolantes térmicos reduzidos ao mínimo. Contudo, a crescente preocupação com a eficiência energética e a sustentabilidade dos edifícios originou a publicação de um regulamento térmico – o RCCTE - em 2006, que estabeleceu limites nos consumos energéticos dos edifícios, promoveu o aumento dos requisitos mínimos para cerca do dobro e estabeleceu o valor mínimo das renovações de ar por hora de  $0,6 \text{ h}^{-1}$ . Assim, a renovação do ar interior passa a assumir, de forma implícita, uma maior importância no desempenho térmico dos edifícios, ao exigir uma maior precisão na sua quantificação, com valores diferenciados para os diversos edifícios em função da preocupação com a qualidade do ar interior e a eficiência energética dos edifícios (Carlos *et al.*, 2010).

Desde a aplicação do regulamento supracitado, o Decreto-Lei 80/2006, denota-se uma crescente preocupação com a renovação do ar interior, influenciada pelo aumento do isolamento térmico

da envolvente exterior e do aumento da estanquicidade nos envidraçados ao ar exterior, o que dificulta a promoção da ventilação natural dos edifícios. Este sistema de ventilação tem como princípio de funcionamento a introdução de ar exterior, através de aberturas nas fachadas, que procederá ao varrimento do espaço interior e será encaminhado de volta para o exterior recorrendo a aberturas ou canalizações próprias para o efeito – através do designado efeito de chaminé (Figura 4) – aproveitando assim as correntes de convecção nas quais o ar mais quente (ar interior) tem tendência para subir relativamente ao ar mais frio (ar exterior infiltrado).



Figura 4 - Efeito de chaminé na ventilação natural (HHSM, 2014)

Ao conjugar-se a crescente dificuldade de renovação do ar interior através da ventilação natural com a inexistência de um sistema de ventilação mecânica, a consequência mais evidente resulta no aumento das condensações interiores devido à insalubridade do ar e de condições de humidade desaconselháveis. Todos os edifícios necessitam de renovar o ar interior, existindo um custo energético associado a esta tomada de ar que nos climas mais frios e segundo o RCCTE corresponde entre 30 a 50% das necessidades de aquecimento totais dos edifícios residenciais, (Carlos *et al.*, 2010). Torna-se então imperativo desenvolver tecnologias que ajudem a reduzir as referidas necessidades.

As estratégias das políticas bioclimáticas visam uma maior eficiência energética, apontando para tal, um conjunto de soluções que proporcionam as condições de conforto adequadas com consumos energéticos mais reduzidos. Essas soluções podem incluir medidas simples como a orientação eficiente dos envidraçados, a espessura e a localização adequadas dos isolamentos térmicos, a proteção exterior dos envidraçados com vegetação de folha caduca ou a utilização de tecnologias que utilizem fontes locais renováveis de energia para reduzir os consumos energéticos.

### **2.3. Permutadores de calor ar-solo**

Os edifícios, residenciais e de escritórios, usam maioritariamente energia elétrica para obter conforto para os seus utilizadores, tanto a nível visual e ergonómico, como essencialmente a nível térmico. Com o objetivo de reduzir a energia consumida pelos edifícios, podem ser incorporados vários sistemas passivos nos equipamentos de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (De Paepe & Janssens, 2002). Os sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento são reconhecidos pela sua capacidade em consumir pouca ou quase nenhuma energia quando comparados com sistemas ativos (Mathur *et al.*, 2012). Para manter um nível de conforto aceitável para os utilizadores, poderá ser necessário proceder ao pré-aquecimento do ar exterior destinado à renovação do ar interior, com repercussões no consumo energético por via das perdas térmicas que ocorrem com a exaustão do ar viciado. Uma medida para reduzir o consumo energético, que não implique uma redução da taxa de ventilação mantendo o conforto térmico mínimo desejável, será recorrer a sistemas de aquecimento passivo, proporcionando a redução do consumo energético e das respetivas emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (Carlos *et al.*, 2010)

Os sistemas de ventilação com permutadores de calor ar-solo constituem uma opção interessante para reduzir o consumo de energia utilizada na ventilação mecânica, pois aproveitam a menor flutuação da temperatura que se verifica no solo ao longo do ano, a partir de uma determinada profundidade. Desta forma, o ar insuflado no edifício é pré-aquecido ou pré-arrefecido até uma temperatura próxima da de conforto, diminuindo assim as perdas de energia pela renovação de ar.

### **2.4. Energia geotérmica de baixa profundidade**

O planeta Terra é constituído por um núcleo com temperaturas de tal forma elevadas que os elementos químicos constituintes das rochas superficiais estão no estado líquido. No entanto, devido à grande massa de solo e de material rochoso que constituem a Terra, as diferenças de temperatura entre o núcleo e a superfície são bastante acentuadas. Isto porque, segundo as leis da Física, quanto maior for a massa de um determinado material, maior será a sua resistência a reagir a possíveis diferenciais de temperatura – fenómeno designado por inércia térmica. A inércia térmica é diretamente proporcional à profundidade, motivo pelo qual as camadas superficiais dos solos apresentam uma maior amplitude térmica quando comparadas com as camadas mais interiores. Quer isto dizer que as camadas superficiais são mais vulneráveis à intensidade da radiação solar do que as interiores, motivo pelo qual existem dois fenómenos característicos dos

solos: o desfasamento e a atenuação. O fenómeno de desfasamento ocorre devido às constantes diferenças de temperatura entre as camadas superficiais e as mais profundas, enquanto a atenuação corresponde ao fenómeno de diminuição da interferência das temperaturas atmosféricas no solo, com o aumento da profundidade. A capacidade geotérmica do solo é tal que as variações diárias da temperatura superficial terrestre não se fazem sentir a mais de 0,50 metros de profundidade e as variações sazonais até uma profundidade de aproximadamente 3 metros (Mathur *et al.*, 2012).

O gráfico da Figura 5 representa os valores da temperatura do ar e do solo medidos na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro ao longo do ano de 2005. Como é possível observar, o solo apresenta uma temperatura média de 17°C aproximadamente constante ao longo do ano e a uma profundidade de 4 metros. Além disso, a temperatura do ar (pontos verdes) não só varia mais do que a temperatura do solo ao longo do ano, como também apresenta valores mais elevados no Verão e mais baixos no Inverno, comparativamente à temperatura do solo. Em última análise, pode-se também constatar que a temperatura do solo vai-se tornando aproximadamente constante à medida que a profundidade do solo aumenta.

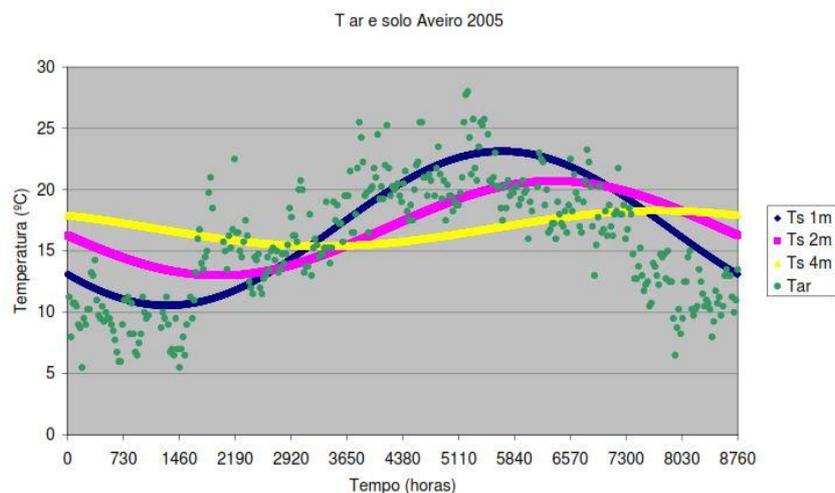


Figura 5 – Registo da temperatura diária do ar e do solo na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro, no decorrer do ano de 2005 (Monteiro, 2008)

Designa-se por geotermia, não só a ciência que estuda os fenómenos naturais que ocorrem abaixo da crosta terrestre, como também a fonte de energia renovável que aproveita as características do solo para produzir eletricidade ou calor. Geralmente, a energia geotérmica encontra-se dividida em duas categorias: a energia de baixa ou de alta profundidade (ou entalpia). À medida que a profundidade aumenta, a capacidade de produção de energia do solo também é maior. A energia

geotérmica de baixa profundidade está compreendida, de forma aproximada, no intervalo de temperaturas de solo entre os 30 e os 90°C, que corresponde a profundidades compreendidas entre os 2 e os 100 metros. Nesta gama de profundidades já é possível, atualmente e no setor residencial, aproveitar a energia geotérmica para efetuar o aquecimento de águas quentes sanitárias, de sistemas de pavimentos radiantes com tubos enterrados no solo e de sistemas de permutador de calor ar-solo (ADEME, 2012).

O uso direto da energia geotérmica é uma das formas mais antiga, versátil e comum de utilização de energia (Dickson & Fanelli, 2003) e as comprovadas capacidades deste tipo de energia renovável têm levado a um contínuo crescimento, a nível global, do seu aproveitamento. A utilização direta de energia geotérmica em 78 países (em 2010) representa um aumento significativo dos 72 países que a utilizavam em 2005, dos 58 em 2000 e dos 28 em 1995. A capacidade total de energia geotérmica instalada mundialmente, referente ao final do ano de 2009, é de 48,483 MWt correspondente a um crescimento de 72% desde o Congresso Mundial de Geotermia em 2005 e a um crescimento anual de 11,4%. A quantidade de energia economizada corresponde a cerca de 250 milhões de barris de petróleo por ano, prevenindo a libertação para a atmosfera de 33 milhões de toneladas de carbono e 107 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (comparando com o uso de combustíveis fósseis para a produção de energia) (Boyd, Lund & Freeston, 2011).

A popularidade e o aumento da consciência (ambiental), a nível mundial, causaram um enorme impacto no uso de sistemas de aproveitamento de calor do solo: o aproveitamento de energia dos referidos sistemas cresceu 2,29 vezes a um ritmo anual de 18% quando comparado com os valores de 2005 (Boyd, Lund & Freeston, 2011). A capacidade instalada aumentou 24% e o uso anual de energia para aquecimento de espaços interiores aumentou 14% (Boyd, Lund & Freeston, 2011). Segundo os mesmos autores, 86% da capacidade instalada e 85% da energia utilizada anualmente é aplicada no aquecimento de zonas urbanas e, no caso português, isso já acontece em Chaves e São Pedro do Sul.

## 2.5. Princípios de funcionamento e tipos de sistemas

A ideia de usar o solo como fonte de calor é há muito conhecida. Por volta do ano 3000 antes de Cristo, o povo que ocupava a área do atual Irão usava torres de vento e túneis subterrâneos como meio de arrefecimento passivo (Ozgener, 2011). Com a evolução da tecnologia deixou de ser necessário escavar túneis subterrâneos e passou-se a usar os chamados permutadores de calor ar-solo com tubos enterrados ou, utilizando a designação inglesa, *Earth-to-Air Heat Exchangers* (EAHE). O EAHE é um de vários sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento e possui uma relativa vantagem sobre a grande maioria de outros sistemas, graças à sua capacidade de providenciar ambos os efeitos: aquecimento nos meses mais frios e arrefecimento nos meses mais quentes (Mathur *et al.*, 2012). Este sistema é normalmente constituído por uma série de tubos enterrados no solo dispostos a todo o comprimento do edifício, num terreno adjacente ou dispostos verticalmente no solo. Um fluido (água ou ar) é usado no Verão para remover calor do ambiente interior do edifício e é posto a circular através do solo e vice-versa no Inverno (Florides & Kalogirou, 2007). Ou seja, este sistema é constituído por um ou vários tubos enterrados no solo, ligados diretamente ao sistema de ventilação mecânico. Recorrendo a um ventilador, o ar circula nos tubos enterrados enquanto ocorrem as transferências de calor de convecção do ar para o tubo e de condução do tubo para o solo. Efetua-se assim o pré-aquecimento ou o pré-arrefecimento do ar antes de ser introduzido dentro dos edifícios e realizar a renovação do ar, como se pode ver na Figura 6.

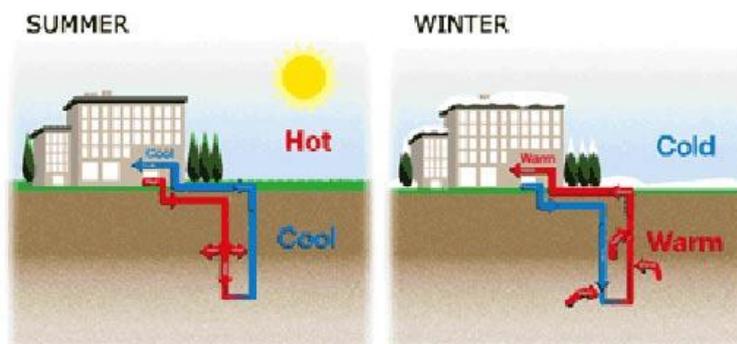


Figura 6 – Esquema ilustrativo do funcionamento do sistema EAHE (TAES, 2013)

O desempenho energético dos sistemas EAHE pode ser afetado pelo tipo de material escolhido para os tubos (quanto maior for o seu coeficiente de transmissão térmica, menor será a sua resistência às trocas de calor), pelo ventilador escolhido (deve-se dimensionar corretamente todo o sistema para que seja instalado com a potência correta e quanto maior for a eficiência energética do ventilador, menores serão os consumos de eletricidade), pelas características do solo (em termos de transmissividade térmica e de saturação), do clima local (a temperatura do ar exterior

insuflado quando muito elevada ou baixa diminui a eficiência do sistema) e do tipo de sistema (aberto ou fechado) utilizado (Scott, Parsons & Kochler, 1965).

Tal como foi supracitado, as características do solo podem influenciar de forma significativa a eficiência de funcionamento dos sistemas *EAHE* e, por isso, o conhecimento das propriedades térmicas do solo é considerado como uma importante ferramenta nos processos de dimensionamento e de aplicação deste tipo de sistemas. Um dos primeiros passos a adotar aquando da ponderação de aplicação dos permutadores de calor ar-solo passa, por isso, pela caracterização geológica do local. Deve-se reunir informação relativa à presença de aquíferos e da sua capacidade de retenção de água, bem como à profundidade a que a água se encontra armazenada. Em adição, deve-se procurar também obter informações relativas à natureza e às propriedades térmicas e hidráulicas do solo. O conjunto de todas estas informações permite ao projetista escolher o tipo de permutador de calor ar-solo a aplicar, bem como a sua arquitetura e constituição (Ozgener, 2011).

Existem dois principais tipos de sistemas *EAHE*: os sistemas abertos e os fechados. Nos sistemas abertos como o da Figura 7, o ar exterior circula através dos tubos enterrados no solo até chegar ao ventilador, onde é filtrado e introduzido diretamente no interior do edifício. Esta possibilidade de sistema é bastante utilizada nos chamados sistemas híbridos (sistemas que conjugam um sistema de *EAHE* com uma ou várias unidades de ar condicionado, por exemplo).

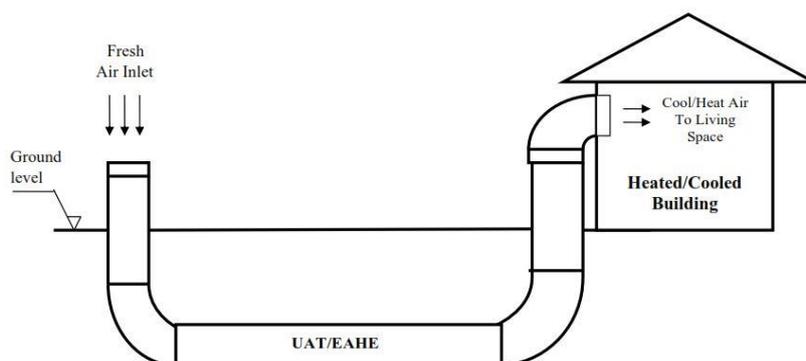


Figura 7 – Esquema exemplificativo de um sistema aberto de um *EAHE* (Ozgener, 2011)

Nos sistemas fechados, como o nome indica, o ar interior é forçado a circular num circuito fechado de tubos enterrados (com várias configurações possíveis) e bombeado de volta para o interior do edifício, como se pode constatar no esquema exemplificativo da Figura 8. Esta configuração é normalmente a que apresenta a melhor relação custo-benefício quando existe espaço suficiente disponível no jardim e as valas são fáceis de escavar (Florides & Kalogirou,

2007). Segundo os mesmos autores, novos equipamentos de escavação permitem efetuar o trabalho horizontalmente e então é possível inserir estes sistemas por baixo de casas já construídas e até de outros edifícios e estradas, com distúrbios mínimos nas camadas superficiais do solo. No entanto, a forma mais prática de colocar estes sistemas é aquando da construção dos edifícios.

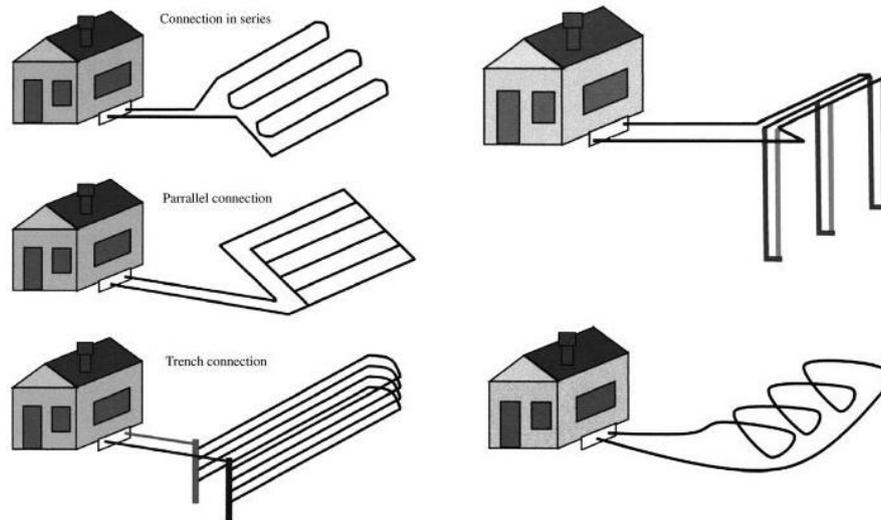


Figura 8 – Exemplos de várias soluções construtivas para sistemas *EAHE* fechados (adaptada de Florides & Kalogirou, 2007)

## 2.6. Vantagens e desvantagens da utilização de sistemas *EAHE*

Os sistemas supracitados apresentam as seguintes vantagens relativamente a outros sistemas passivos semelhantes e aos sistemas convencionais:

- Consumem menos energia para manterem o funcionamento, logo minimizam os problemas de consumos excessivos e conseqüente poluição atmosférica;
- Não utilizam compressores com clorofluorcarbonetos ou outros refrigerantes extremamente poluidores, porque o ar interior é o único fluído considerado;
- Por possuírem tanto um desenho, como uma construção simplificados reduzem bastante a manutenção necessária ao seu bom funcionamento;
- Possuem um custo inicial e de instalação mais baixos por serem utilizadas tubagens maioritariamente de polietileno de alta densidade ou manilhas de betão, e porque os volumes de escavação são relativamente reduzidos;
- Há estudos indicativos de que os *EAHE* nos climas mediterrânico e tropical dispensam qualquer fonte suplementar de aquecimento durante o Inverno.

Relativamente às desvantagens, estes sistemas apresentam as seguintes:

- O ar ao circular através dos tubos pode provocar ruídos que chegam até ao interior dos edifícios;
- A circulação do ar nos tubos pode provocar a condensação de vapor de água. Apesar de o problema ser facilmente resolvido através da colocação de uma bomba no ponto mais baixo do circuito de tubos, esta vai diminuir a eficiência do sistema e aumenta ligeiramente os consumos energéticos;
- É necessária a colocação de filtros específicos ao combate de micro-organismos e poeiras, devido à diminuição da qualidade do ar reciclado (de especial importância nos sistemas fechados).

## **2.7. Impacte ambiental**

Tal como foi referido anteriormente, a queima de combustíveis fósseis para a produção de energia elétrica produz um efeito muito negativo nas condições do meio ambiente. Estima-se que atualmente a produção de energia elétrica e a sua utilização são responsáveis por cerca de 94% das emissões de dióxido de carbono emitidas anualmente. A solução para a diminuição da queima de combustíveis fósseis passa, atualmente, não só pela redução dos consumos energéticos, como também pela maior produção de eletricidade a partir de energias renováveis. Os permutadores de calor ar-solo são apontados como uma solução plausível para a redução efetiva dos consumos energéticos dos edifícios porque funcionam recorrendo a uma energia renovável para diminuir as necessidades energéticas dos edifícios.

Ao serem utilizados permutadores de calor ar-solo como sistema passivo para a manutenção das condições de climatização, reduz-se o impacto ambiental do parque edificado através da diminuição da necessidade de consumo de energia elétrica. Contudo, esta poupança deve ser bem gerida para que não seja desperdiçada.

## 2.8. Estudo de casos de aplicação

### 2.8.1. Edifícios residenciais

A urbanização AlmaVerde foi terminada em 2002 na zona oeste algarvia em Vila do Bispo, perto de Lagos, e consiste num conjunto de 180 moradias unifamiliares distribuídas por 36 hectares de uma antiga quinta com todas as comodidades oferecidas pela hotelaria da região – Figura 9. A construção desta urbanização foi financiada pela União Europeia, através de um Projeto de Demonstração a nível europeu designado *Thermie*, e venceu em 2003 um prémio da Direção Geral de Energia pelo seu desempenho ao nível da eficiência energética.



Figura 9 – Exemplo de uma moradia da urbanização AlmaVerde

Os edifícios foram concebidos visando obter condições de conforto térmico em todas as estações do ano, conjugando uma construção maciça e isolada com um sistema de aquecimento e arrefecimento passivo através de tubos enterrados no solo designado por Sistema *Coolhouse* – Figura 10. O sistema *Coolhouse* funciona através de um conjunto de permutadores de calor ar-solo enterrado, no exterior de cada moradia, a uma profundidade de 2 metros e com cerca de 70 metros de tubagem em PVC de 16 centímetros de diâmetro. Desta forma, o ar exterior é arrefecido no Verão devido à menor temperatura do solo e pré-aquecido no Inverno, sendo depois distribuído no interior do edifício através de uma caixa-de-ar isolada sob o pavimento e inserido no ambiente interior através de ranhuras ao nível dos rodapés (ADENE, 2003).

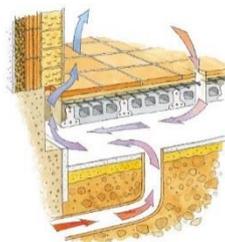


Figura 10 – Imagem ilustrativa do sistema *Coolhouse*

Relativamente às soluções construtivas, os edifícios apresentam uma arquitetura circular que se desenvolve em torno de um *hall* central com pé direito até à cota superior do telhado, possuem dois pisos e uma área total de pavimento de 135 metros quadrados. Os vãos envidraçados estão devidamente orientados a sul e minimizados a norte, os vidros utilizados possuem baixa emissividade e estão protegidos por proteções opacas exteriores. Além disso, as paredes exteriores são duplas, apresentam uma forra interior em adobe para maximizar o conforto acústico e o controlo da humidade e estão isoladas pela envolvente exterior com isolamento térmico para eliminar as pontes térmicas.

Concluída em 2003, a Moradia Oásis localiza-se numa zona rural a norte da cidade algarvia de Faro e foi implantada num terreno em declive orientado a sul. Ao aproveitar as características orográficas do local, os dois pisos do edifício desenvolvem-se em diferentes níveis do terreno e, inclusivé, o primeiro piso encontra-se enterrado a norte – Figura 11.



Figura 11 – Vista geral da moradia Oásis a partir da fachada Este

Este edifício foi construído a partir de uma estrutura que, embora existente desde 1990, encontrava-se inacabada desde então. Apresenta uma planta retangular e foi construído de forma a apresentar uma construção maciça através da utilização de paredes exteriores duplas e paredes interiores maciças. Possui uma variedade de soluções bioclimáticas para melhorar o seu comportamento energético utilizando, para tal, vãos envidraçados de grande dimensões na fachada orientada a sul e reduzidos ao mínimo na fachada norte, vidros duplos de baixa emissividade com proteções solares devidamente dimensionadas e um sistema de permutador de calor ar-solo constituído por 8 tubos enterrados no solo a 2 metros de profundidade e com 25 metros de comprimento cada. Este sistema de permutador de calor ar-solo apresenta uma particularidade interessante: as bocas de insuflação dos tubos encontram-se no interior de uma estufa adjacente ao edifício, insuflando o ar no interior desta para o interior do edifício e funciona em conjugação com a climatização da estufa. Ou seja, na estação de inverno a estufa permanece

fechada para aquecer o ar que vai ser insuflado para o edifício, enquanto na estação de verão a estufa é aberta para que a temperatura do ar desça e não penalize o arrefecimento do edifício.

### **2.8.2. Edifícios de serviços**

O edifício da fundação Aldo Leopold, concluído em 2007, já recebeu vários prémios de sustentabilidade por ter sido projetado para, não só aproveitar de forma eficiente as energias renováveis disponíveis localmente, como também recorreu à reutilização de materiais de construção previamente demolidos e adotou estratégias de arquitetura bioclimática. Ao ser submetido ao sistema de avaliação de sustentabilidade *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)*, este edifício recebeu uma cotação de 61 pontos num máximo possível de 69.

Como se pode observar na Figura 12, este edifício possui um sistema de 198 painéis fotovoltaicos instalados na cobertura, com uma potência de 39.6 kW e capaz de produzir uma média de 60.000 a 70.000 kWh por ano. A produção de eletricidade excedente nos meses de Verão é vendida à empresa de distribuição pública local de forma a compensar a energia que possa ter de ser comprada durante os meses de Inverno. Além disso, o sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado foi dimensionado para funcionar através da conjugação do pavimento radiante com o sistema de permutador de calor ar-solo do edifício. Apesar de trabalharem separadamente, estes sistemas são capazes de manter a temperatura de conforto interior com consumos energéticos entre duas a cinco vezes mais baixos do que um sistema convencional. O sistema de permutador de calor ar-solo aberto utilizou tubos de betão com um diâmetro de 0,60 metros enterrados a uma profundidade variável entre os 3 e os 3,60 metros, com um comprimento de aproximadamente 183 metros. Relativamente ao sistema do pavimento radiante, este foi dimensionado para efetuar as trocas de calor entre o fluído no interior das tubagens e o solo, através de 19 buracos escavados no solo com cerca de 67 metros de profundidade cada, e recorrendo a uma bomba de calor, o pavimento é aquecido ou arrefecido utilizando a energia geotérmica disponível localmente.

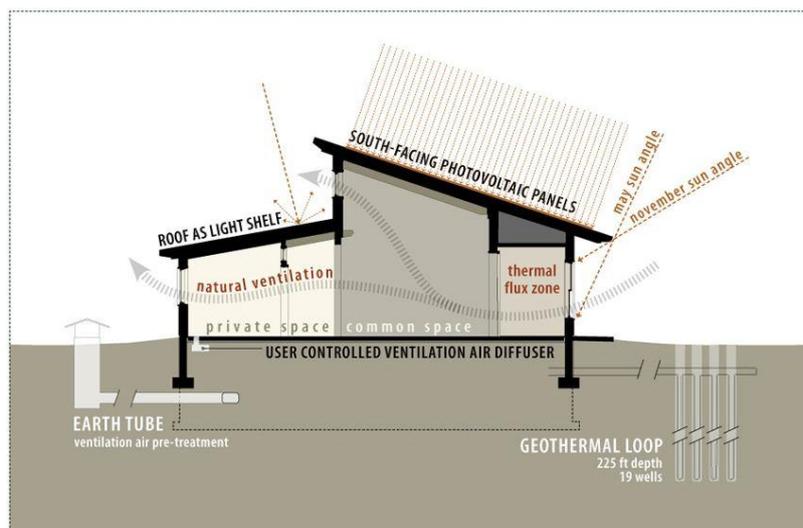


Figura 12 – Arquitetura bioclimática e sistemas passivos utilizados no *Aldo Leopold Legacy Center* (Arch Daily, 2013)

O edifício Solar XXI foi construído no campus do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) no Lumiar, em Lisboa, em 2005. É um edifício com uma área total de 1500 m<sup>2</sup> e construído de raiz para desempenhar funções de serviços e laboratórios. Não obstante ter sido concluído em 2005, este edifício cumpria já os novos requisitos do RCCTE que entrou em vigor em Abril de 2006.

Para além de ter sido projetado com os objetivos de otimizar a qualidade térmica da envolvente exterior, colocando o isolante térmico pelo exterior para reduzir as pontes térmicas, e de potenciar os ganhos solares na estação de aquecimento, orientando a fachada com maior área de envidraçados a sul, este edifício possui ainda um sistema de painéis fotovoltaicos e um sistema de permutador de calor ar-solo. O sistema de painéis fotovoltaicos possui uma área de 100 m<sup>2</sup> e produz energia para o sistema de aquecimento do interior. Relativamente ao sistema de permutador de calor ar-solo, esquematizado na Figura 13, este é constituído por um conjunto de 32 tubos de manilhas de cimento com um diâmetro de 0,30 metros, enterrados a uma profundidade de 4,60 metros. Este sistema aproveita as capacidades geotérmicas do solo que, durante o período de Verão atinge temperaturas médias entre os 16 e os 18°C, permite efetuar o pré-arrefecimento do ar exterior, com temperaturas que podem chegar aos 35°C, antes de ser insuflado para o interior do edifício.

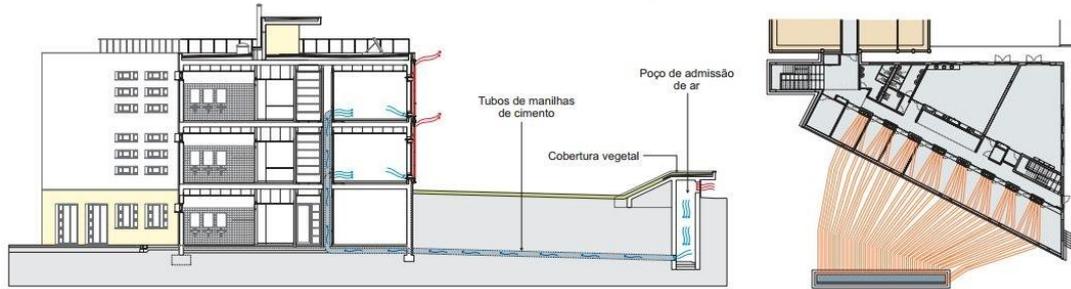


Figura 13 – Exemplo esquemático do funcionamento e da disposição em planta do permutador de calor ar-solo utilizado no Edifício Solar XXI (adaptada de LNEG, 2013)

Relativamente ao *One Angel Square Building*, este edifício multifunções de 15 andares pretende, não só servir de sede administrativa do *Cooperative Group*, como também de espaço comercial. Foi galardoado como sendo o edifício mais sustentável do Reino Unido ao apresentar uma avaliação de 92% no sistema de avaliação da sustentabilidade *Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM)*. Concluído no ano de 2012, este edifício faz parte de um programa de revitalização sustentável de um bairro do centro de Manchester e, como se pode observar na Figura 14, foi dimensionado segundo alguns ideais da arquitetura bioclimática: orientação a sul da fachada com maior área de envidraçados, maximização da iluminação natural ao apresentar cores interiores claras, possui um sistema de reaproveitamento das águas pluviais e possui um desenho interior específico para potenciar o designado efeito de chaminé. Além disso, possui um sistema de permutador de calor ar-solo que insufla um volume de ar exterior de aproximadamente 50 m<sup>3</sup>/s diretamente para o interior do edifício, depois de previamente arrefecido ou aquecido. Desta forma, consegue-se reduzir o funcionamento da unidade de aquecimento e arrefecimento que funciona a partir de óleo alimentar usado.

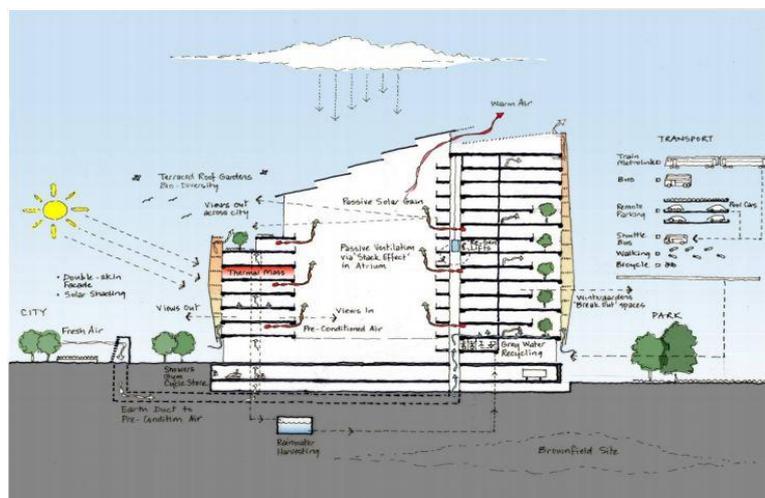


Figura 14 – Esquema ilustrativo das soluções bioclimáticas aplicadas no *One Angel Square Building* (HEVAR, 2013)

### 2.8.3. Estufas

A região indiana de Gujarat é caracterizada por um clima com precipitação escassa e irregular, altas temperaturas ambiente, bem como solos contaminados com sal marinho e com fraca qualidade de água armazenada nos aquíferos. É pelo conjunto destes motivos que a atividade agrônoma local apresenta um rendimento fraco e bastante propenso a riscos. No decorrer da década de 1990 foram efetuados vários estudos com o objetivo de identificar soluções de climatização de estufas que permitissem o aumento da competitividade do sector da agricultura local. A prática mais comum utilizada nessa altura correspondia ao uso conjunto de sistemas nebulizadores de água, de sistemas almofadados e de ventiladores. No entanto, os estudos efetuados concluíram que, na referida região da Índia, uma estufa com um volume de 360 metros cúbicos requeria o gasto de cerca de 400 litros de água para um total de cinco horas de operação. Tendo em conta que a operação do sistema iria ocorrer durante quase todo o ano, ficou claro que a utilização do sistema convencional não permitia obter uma melhoria significativa da competitividade comparativamente com a agricultura a céu aberto (Sharan & Jadhav, 2003).

Foi então que, em 2003, Girja Sharan iniciou os seus estudos de aplicação de um sistema de permutador de calor ar-solo na climatização de estufas. Para tal, desenvolveu uma estufa com um volume de 420 metros cúbicos construída com uma estrutura em aço galvanizado revestida por mantas em polietileno com elevada resistência à radiação ultravioleta. Como se pode observar na Figura 15, o sistema de tubos enterrados é constituído por duas fileiras de quatro tubos cada enterradas a profundidades distintas: a mais funda está enterrada a 3 metros de profundidade e a menos funda está enterrada 1 metro acima da anterior. Os tubos são todos em aço macio e cada um deles possui um comprimento de 23 metros, diâmetro interno de 20 centímetros, espessura de 3 milímetros e estão enterrados com um espaçamento de 1.5 metros entre si. Além disso, existe uma tubagem comum localizada em ambos os extremos dos tubos que faz a ligação entre o interior da estufa e os tubos enterrados (Sharan & Jadhav, 2003).

O ventilador instalado no sistema *EAHE* está dimensionado para mover um caudal de ar equivalente a 20 renovações por hora do ar interior, o que corresponde a um total de 7200 m<sup>3</sup>/h e uma velocidade média de 8 m/s no interior de cada tubo. Para movimentar esta quantidade de ar, foi instalado um motor de 7.5 cv.

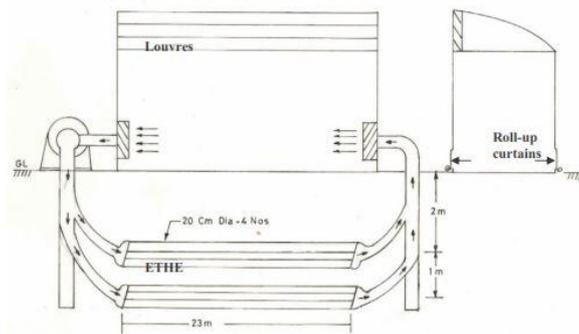


Figura 15 – Esquema exemplificativo da estufa construída por Girja Sharan

O sistema de permutador de calor ar-solo está programado para que, durante a estação de aquecimento, funcione sempre que a temperatura no interior da estufa ultrapasse os valores compreendidos entre os 15°C e os 22°C. Foi observado que, em média, sempre que o sistema entrava em funcionamento, demorava cerca de 30 minutos para aumentar a temperatura dos 15 para os 22°C. No decorrer da estação de arrefecimento, o sistema só entra em funcionamento quando a temperatura no interior da estufa ultrapassa os 36°C, visto que a estufa possui sistemas de sombreamento, de abertura e fecho de secções de ventilação e de nebulização de água para controlar a temperatura.

Por último, e a título de curiosidade, estudos posteriores comprovaram que o modelo de estufa descrito anteriormente contribui para o aumento da qualidade dos vegetais e da quantidade de produção, ao mesmo tempo que se reduz a quantidade de água consumida em cerca de 34%.

## 2.9. Investigação e desenvolvimento no domínio dos sistemas *EAHE*

O potencial do permutador de calor ar-solo para o aquecimento é bem aceite nos países mais frios (Mathur *et al.*, 2012). Mas para que esta aceitação tenha sido tomada, foram necessários vários estudos e experiências realizadas por especialistas para elevar o conhecimento sobre a tecnologia que está na génese deste trabalho. Desde a segunda metade do século XX, uma quantidade assinalável de investigadores estudou o potencial dos tubos enterrados no solo (Goswami & Ileslambou, 1990). Muitos aspetos sobre os permutadores de calor ar-solo foram já estudados e, de seguida, são descritos os avanços mais importantes.

No século XIX, Wilkonson dimensionou um estábulo com capacidade para 148 animais, no qual uma passagem subterrânea com cerca de 150 metros de comprimento era utilizada para arrefecimento durante o Verão (USDA, 1960). Mogensen (1983) apresentou um teste de resposta

térmico (TRT na sigla anglo-saxónica) que se tem mostrado um método bastante eficiente para determinar a condutibilidade térmica do solo. Florides & Kalogirou (2007) apresentaram uma revisão dos sistemas de permutadores de calor ar-solo, modelos existentes e possíveis aplicações. Explicaram ainda diversos métodos e alguns modelos de cálculo. Mihalakakou, Santamouris & Asimakopoulos (1992) avaliaram experimentalmente o desempenho geotérmico dos sistemas *EAHE*, usando para isso modelos matemáticos por eles desenvolvidos. Santamouris *et al.* (1997) investigaram ainda o impacto de diferentes configurações da superfície do solo como condições barreira de sistemas *EAHE* e chegaram à conclusão que os solos cobertos com relva proporcionam melhores condições de arrefecimento do que os solos sem vegetação. Na mesma perspetiva, Givoni (2007) conseguiu provar que o potencial dos referidos sistemas é melhorado nos climas mais quentes quando se adotam medidas como a utilização de vegetação ou árvores para criarem sombra, irrigação superficial ou a disposição de uma camada de seixos diretamente sobre o solo. Kabashnikov *et al.* (2002) concluíram que a capacidade de realizar as trocas de calor entre o solo e os tubos é maximizada com o aumento do comprimento destes, até atingir um ponto de saturação. Este ponto de saturação depende da frequência das variações de temperatura e do volume de ar a circular no interior dos tubos enterrados. Bansal *et al.* (2010) investigaram a análise da performance de um sistema *EAHE* na estação do verão na Índia e concluíram que o desempenho do sistema não é maioritariamente afetada pelo tipo de material do tubo, mas sim pela velocidade do fluído.

Goswami & Dhaliwal (1990) realizaram uma breve revisão literária dos artigos publicados até então e apresentaram uma solução analítica para o problema de transferência de calor momentâneo entre o ar e o solo circundante à medida que o ar circula no interior do tubo enterrado. Ghosal, Tiwari & Srivastava (2004) e Ghosal & Tiwari (2006) descreveram detalhadamente a modelação de um permutador de calor ar-solo aplicado no projeto de uma estufa em Nova Dheli, Índia. No segundo estudo, os investigadores constataram que com a aplicação do sistema *EAHE* as temperaturas médias no interior da estufa aumentaram aproximadamente 8°C no inverno e diminuíram cerca de 6°C no verão. Além disso, eles comprovaram que os resultados obtidos se deveram ao aumento do comprimento e diminuição do diâmetro dos tubos enterrados, da diminuição do caudal de ar que circula no interior dos tubos e do aumento da profundidade até aos 4 metros. Simulações numéricas, técnicas e de avaliação económica foram efetuadas por Bojicǐ *et al.* (1997), bem como a análise de alguns parâmetros dos *EAHE*. Eles utilizaram o mesmo sistema para as situações de aquecimento e arrefecimento e concluíram que o consumo energético associado sofre uma maior redução no verão do que no

inverno. Scott, Parsons & Kochler (1965) realizaram um estudo onde avaliaram o comportamento de um tubo de aço enterrado e, com os resultados obtidos, comprovaram o potencial de utilização dos sistemas de permutador de calor ar-solo.

Ajmi, Loveday & Hanby (2006) estudaram a capacidade de arrefecimento do sistema *EAHE* em edifícios domésticos. Goswami & Ileslamlou (1990) publicaram um artigo sobre o estudo de um sistema híbrido fechado, em que se associava um permutador de calor ar-solo a uma unidade de ar condicionado, com o objetivo de determinar o COP do sistema. Os autores concluíram que a temperatura do solo em contacto com os tubos aumentava, o que provocava limitações no desempenho do sistema. Ao efetuar um estudo custo-benefício sobre a aplicação de um sistema *EAHE*, Ozgener *et al.* (2007) concluíram que o sistema de tubos enterrados assume uma cota de 24-26% do custo total de instalação do sistema. Por esse mesmo motivo, os processos de dimensionamento e construção devem ser cuidadosamente pensados para que seja assegurada uma instalação com os preços mais baixos e um ciclo de vida longo. Bojicǎ *et al.* (1997) avaliaram o desempenho técnico e económico dos sistemas *EAHE* ao utilizarem tubos de aço e PVC, dividindo o solo e os tubos em volumes elementares para obterem equações matemáticas. Simulações horárias realizadas ao longo de um ano completo por Bansal & Mathur (2009) permitiram avaliar a performance de um sistema híbrido, constituído por uma unidade de ar condicionado e um permutador de calor ar-solo, utilizando um modelo de dinâmica computacional de fluídos multifase. Por conseguinte, Wu, Wang & Zhu (2007) desenvolveram um modelo implícito, baseado na transferência de calor numérica e na modelação de fluídos dinâmicos, e implementaram-no no *software* informático “*Phoenix*” com o objetivo de avaliar os efeitos de parâmetros operacionais como o comprimento, o diâmetro, a profundidade e o caudal de ar circulante no interior dos tubos na capacidade de aquecimento e arrefecimento.

## **2.10. Simulação energética - EnergyPlus**

O “*EnergyPlus*” é um programa de simulação energética desenvolvido e fornecido pelo Departamento de Energia do Estados Unidos da América (*United States Department of Energy*). Este programa foi criado tendo como base os programas de simulação energética *BLAST* (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e *DOE-2*, ambos desenvolvidos e disponibilizados entre o final da década de 1970 e o início da década de 1980. A criação destes dois programas de simulação energética foi impulsionada pela crise energética vivida no início dos anos 70 e pela constatação de que a energia consumida pelos edifícios americanos

correspondia a uma larga fatia das necessidades energéticas do país. Foram desenvolvidos tendo os engenheiros projetistas e os arquitetos como público-alvo e permitiam o dimensionamento de equipamentos de aquecimento, ventilação e ar condicionado, determinação da análise dos custos de ciclos de vida e otimização do comportamento energético, entre outras particularidades.

Tal como os programas referidos anteriormente, também o *EnergyPlus* é considerado um programa informático de simulação que analisa o comportamento energético dos edifícios e as suas cargas térmicas. Baseando-se na perspetiva da descrição física do edifício e da sua envolvente, nos sistemas mecânicos e outras características fornecidas pelo utilizador, o *EnergyPlus* faz a modelação do aquecimento, do arrefecimento, da iluminação, da ventilação, entre outros fluxos energéticos, e do consumo de água. Permite ainda definir intervalos de tempo inferiores a uma hora, sistemas modulares e redes integradas na simulação do equilíbrio base da zona, fluxos de ar entre várias zonas, requisitos de conforto térmico, parâmetros de consumo de água, ventilação natural e sistemas fotovoltaicos.

Para poder realizar as simulações energéticas o *EnergyPlus* exige a utilização de um ficheiro climático EPW (*EnergyPlus Weather Format*) referente à região onde se implanta o edifício em estudo. Este tipo de ficheiros climáticos tenta reproduzir o chamado “ano sintético” para representar não só a temperatura local e a radiação solar, como também todas as outras variáveis baseadas em modelos solares avançados e mais próximos das condições médias climáticas a longo-termo, que permitam prever consumos energéticos mais realistas (*EnergyPlus*, 2013). O ano sintético é então criado a partir de dados de estações meteorológicas referentes, na grande maioria das situações, aos últimos trinta anos.

Por ser um programa informático que permite introduzir e avaliar o desempenho geral de um grande número de parâmetros de dimensionamento, o *EnergyPlus* permite que sejam pedidos inúmeros resultados. Os resultados pedidos podem ser apresentados sob a forma de relatório, de tabelas sumárias ou em ficheiros de texto compatíveis com o formato utilizado pelo Microsoft Excel.

### **2.11. Metodologia seguida pelo *EnergyPlus***

Embora seja um programa informático de simulação energética bastante completo, o *EnergyPlus* requer alguma habituação quanto ao interface gráfico e à metodologia de avaliação. A elevada quantidade de campos para preenchimento de parâmetros pode parecer excessiva mas, no

entanto, após o período de adaptação percebe-se que o interface gráfico está concebido de forma a disponibilizar a informação de forma simples e direta – Figura 16. Ao selecionar cada uma das opções do separador da esquerda é mostrado o conjunto de todos os parâmetros e/ou opções que é possível escolher ou introduzir nos separadores da direita. Por vezes, é também apresentada uma pequena descrição da opção selecionada e, no caso de opções com valores numéricos, são referidos os valores máximos e mínimos que o *software* permite escolher.

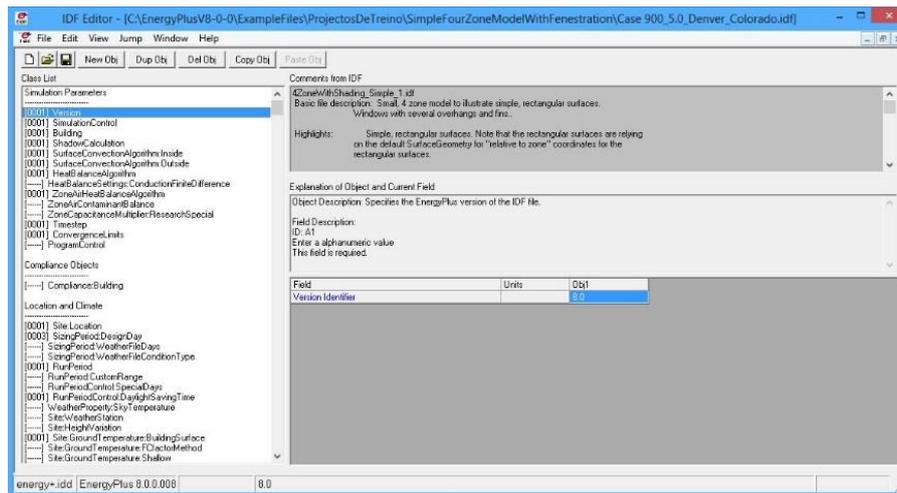


Figura 16 – Imagem exemplificativa do interface gráfico do *EnergyPlus*

No que toca à aprendizagem da metodologia de utilização, segundo o manual de utilização do *EnergyPlus* podem definir-se quatro etapas essenciais:

- i. **Planeamento antecipado** – a construção de um modelo no *EnergyPlus* exige vários tipos de informação que devem ser conjugados e apurados, o que pode consumir algum tempo. Por forma a facilitar a reunião de informação necessária ao desenvolvimento do modelo deve-se começar por obter a localização exata do edifício, bem como, se possível, um ficheiro climático correspondente a essa localização que seja disponibilizado *pele United States Department of Energy*. De seguida, é aconselhável recolher informações sobre a construção do edifício para que seja possível especificar não só a sua geometria, como também as soluções construtivas adotadas para as paredes, lajes de pavimento, cobertura, janelas e portas. Além disso, é também aconselhável reunir informação sobre a iluminação interior, os equipamentos utilizados (se funcionam a gás, elétricos, etc.) e o número de ocupantes em cada compartimento do edifício. Por último, deve-se obter informação sobre o tipo de equipamento HVAC escolhido e o seu horário de funcionamento previsto.

**ii. Divisão do Edifício em zonas** – para que o edifício seja corretamente dividido em zonas é necessário distinguir a diferença entre superfícies de transferência de calor e superfícies de armazenamento de calor. Se se considerar uma superfície do edifício como o elemento fundamental de um modelo, podemos então definir uma superfície como sendo armazenadora de calor a não ser que seja definida como uma que transfere calor (EnergyPlus, 2013). Ou seja, uma superfície que separa dois espaços com temperaturas significativamente diferentes deve ser definida como sendo uma superfície de transferência de calor. Assim, pode-se assumir que as superfícies do edifício em contacto com o exterior (paredes exteriores, telhados e lajes de pavimento) são responsáveis por transferirem calor e são definidas como superfícies de transferência de calor. Da mesma forma, é possível definir as paredes interiores como sendo superfícies de armazenamento de calor se estas separarem espaços que estejam à mesma temperatura ou como superfícies de transferência de calor se separarem espaços que não estejam à mesma temperatura.

O conceito de zona adotado pelo *EnergyPlus* não é um conceito maioritariamente geométrico, mas sim térmico. Uma zona térmica pode ser definida como um volume de ar a uma determinada temperatura uniforme, para além de todas as superfícies de transferência e de armazenamento de calor que limitam ou estão contidas no interior desse mesmo volume (EnergyPlus, 2013). De uma forma expedita, define-se o número mínimo de zonas através da quantidade de sistemas de ventilação que servem o edifício, em detrimento do número de compartimentos. Desta forma, se dois ou mais compartimentos distintos forem climatizados pelo mesmo sistema de ventilação, estes podem ser considerados uma única zona térmica.

Esta definição de zonas deve ser o mais rigorosa possível, visto que o *EnergyPlus* simula o equilíbrio térmico nas superfícies que limitam cada zona e no volume de ar contido nestas. Para fins de cálculo de transferência de calor não é estritamente necessária uma correta definição geométrica das superfícies das zonas, até porque as superfícies não têm de estar em contacto entre si, visto que desde que o programa saiba quais as superfícies que transferem calor para as zonas, o equilíbrio térmico é corretamente calculado (EnergyPlus, 2013).

**iii. Preparação da modelação do edifício** – nesta fase é aconselhável que o utilizador faça um esboço do edifício que contenha a definição de todas as zonas, conforme foi indicado no ponto anterior, e as dimensões espaciais de cada uma delas. Não obstante, é também

aconselhável que o utilizador reúna informações adicionais sobre as soluções construtivas das superfícies do edifício antes de iniciar a modelação.

De uma forma simples, pode-se assumir que a modelação de um edifício deve apresentar os seguintes aspetos:

- **Determinação das superfícies de transferência e de armazenamento de calor** – estas superfícies podem ser descritas sem nenhuma ordem específica, podem ser agrupadas por zonas e as características de cada uma delas podem ajudar à sua categorização, bem como identificar a informação da construção da superfície. Como se pode observar na Tabela 1, os tipos de superfícies admitidas pelo *EnergyPlus* são os seguintes:

Tabela 1 – Tipos de superfícies e respetiva categorização

<b>Tipo de Superfície</b>	<b>Aplicação</b>
<i>BuildingSurface:Detailed</i>	Paredes, Telhados, Tetos e Pavimentos
<i>FenestrationSurface:Detailed</i>	Janelas, Portas Maciças e Portas de Vidro
<i>InternalMass</i>	Superfícies inseridas numa zona (muretes, corrimões, etc.)
<i>Shading:Site:Detailed</i>	Elementos de sombreamento externos ao edifício (outros edifícios, muros, árvores, vegetação, etc.)
<i>Shading:Zone:Detailed</i>	Elementos de sombreamento pertencentes ao edifício (pala horizontais ou verticais, varandas, etc.)

- **Definição de superfícies equivalentes** – à semelhança da simplificação da quantidade de zonas que foi referida anteriormente, também a definição das superfícies do edifício pode ser reduzida em termos de quantidade, recorrendo ao conceito de superfície equivalente. Ao partir-se do princípio que, por exemplo, todas as superfícies de armazenamento de calor, construídas da mesma forma e inseridas numa mesma zona, podem ser definidas como uma simples superfície retangular, então as dimensões da superfície de armazenamento equivalente serão iguais à soma das áreas das superfícies de armazenamento dessa zona. O objetivo desta simplificação é procurar um nível adequado de detalhe que caracterize a envolvente do edifício, sem desperdiçar muito tempo na descrição e computação de resultados para detalhes que sejam insignificantes (*EnergyPlus*, 2013) como se pode observar na Figura 17.

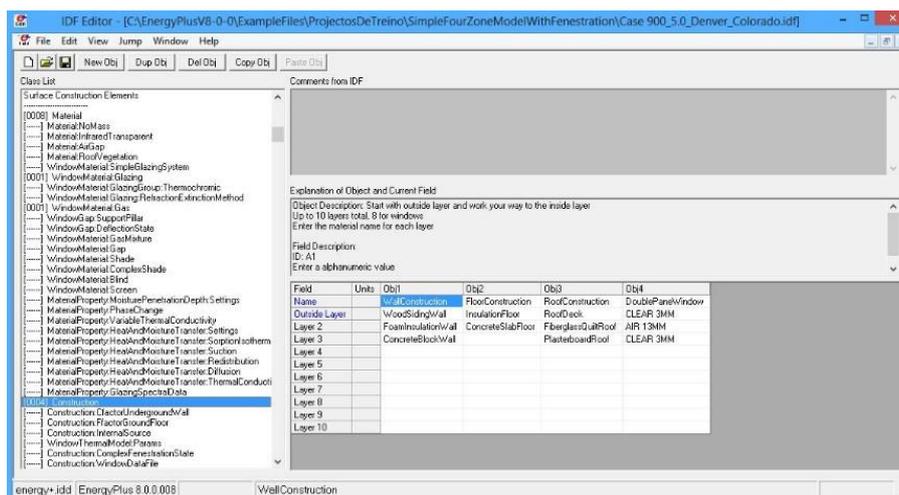


Figura 17 – Imagem exemplificativa da definição de superfícies equivalentes

Como possíveis definições de superfícies equivalentes, o manual do *EnergyPlus* sugere as seguintes simplificações:

- Definir todos os telhados e pavimentos com a forma retangular, independentemente da forma da zona. Assim, cada zona pode ter um telhado e um pavimento retangulares de uma determinada solução construtiva;
- Definir todas as superfícies de armazenamento de calor com a mesma solução construtiva e dentro da mesma zona como uma superfície equivalente. As dimensões da superfície equivalente são obtidas através da soma das áreas das superfícies individuais expostas à zona;
- Combinar todas as janelas de uma determinada superfície exterior numa única janela porque, de uma forma geral, cada superfície deve ter apenas uma janela de cada tipo. No que toca às palas, estas podem requerer que mais janelas sejam combinadas ou separadas, dependendo de cada caso.

- **Definição dos elementos construtivos** – no *EnergyPlus* é possível utilizar alguns dos vários conjuntos de dados, disponibilizados na pasta *DataSets*, que representam algumas das soluções construtivas mais utilizadas e são disponibilizados juntamente com o programa em formato \*.IDF. Estes conjuntos de dados foram criados a partir das soluções presentes nos capítulos 25 e 30 da publicação *ASHRAE Handbook of Fundamentals (2005)* e são apresentados vários exemplos de soluções construtivas de forma simples e para edifícios com inércia térmica fraca, média ou forte. Outra possibilidade de definição dos elementos construtivos pode ser a forma convencional, na qual definimos manualmente os parâmetros para cada tipo de material introduzido, como se pode observar na Figura 18.

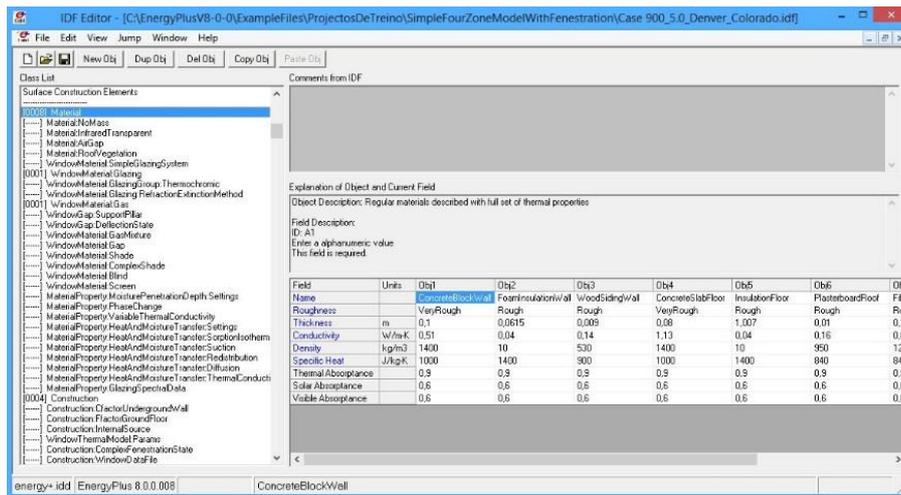


Figura 18 – Imagem exemplificativa da introdução de materiais no *EnergyPlus*

iv. **Preparação da modelação do edifício** – nesta fase é aconselhável que o utilizador estabeleça uma rotina de funcionamento da iluminação, equipamentos, atividades humanas (tarefas), infiltração do ar exterior e a ventilação dos edifícios, visto que todos eles constituem os ganhos internos para as zonas térmicas (*EnergyPlus*, 2013). Estes ganhos internos são introduzidos no *EnergyPlus* sob a forma de um nível de dimensionamento, também designado por nível de pico, com um horário de funcionamento detalhado que especifica uma fração desse nível para cada hora – Figura 19.

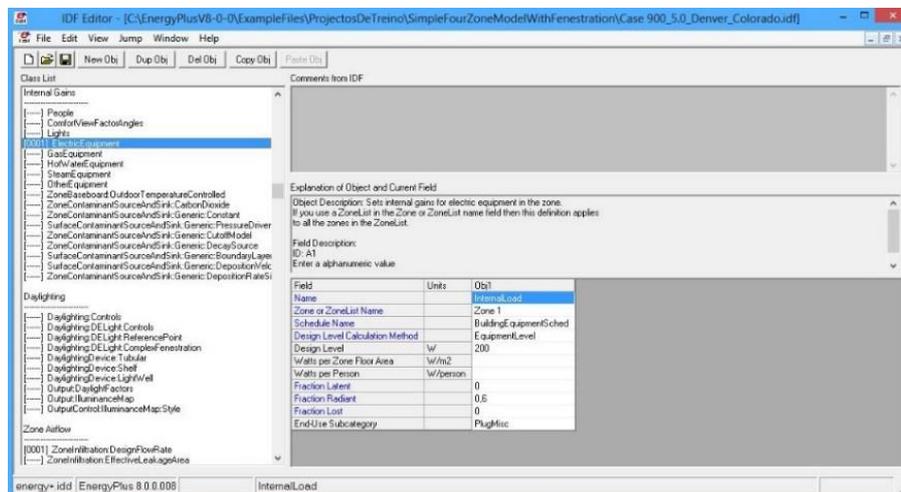


Figura 19 – Imagem exemplificativa da introdução de ganhos internos no *EnergyPlus*

## 2.12. ZoneEarthTube e CalcSoilSurfTemp

O modelo de um tubo enterrado no solo (*ZoneEarthtube*) proporciona uma modelação que, embora simples, utiliza um modelo complexo de transferência de calor para o solo de modo a

estabelecer a temperatura do solo à profundidade a que se encontra o tubo (*EnergyPlus*, 2013).

Para tal, o *EnergyPlus* assume que se verificam as seguintes hipóteses:

- O fluxo de convecção no interior do tubo é hidrodinâmica e termicamente desenvolvido;
- A temperatura do solo na proximidade do tubo é uniforme a partir de uma determinada distância ao centro do tubo, distância essa que corresponde ao seu raio do tubo considerado;
- O perfil de temperatura do solo na proximidade do tubo não é afetado pela presença do tubo, considerando-se assim, que a temperatura da superfície do tubo é uniforme em toda a sua direção axial;
- O solo que rodeia o tubo enterrado tem uma condutividade térmica homogénea;
- O tubo possui uma secção transversal uniforme em toda a sua direção axial;
- A velocidade do vento corresponde ao valor médio anual, sendo este valor calculado pelo *EnergyPlus* a partir dos dados do ficheiro climático seleccionado;
- O coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo é função do valor médio anual da velocidade do vento.

Os permutadores de calor ar-solo, quando modelados no *EnergyPlus*, podem ser controlados através de um horário operacional e pela indicação de temperaturas de funcionamento mínima e máxima e um valor diferencial que limita a diferença de temperaturas entre os ambientes interior e exterior do edifício. Tal como as infiltrações e a ventilação, também o fluxo de ar que circula no interior dos tubos pode ser modificado pelo diferencial de temperaturas referido anteriormente e pela velocidade do vento. O *EnergyPlus* utiliza a seguinte equação para calcular a taxa de fluxo de ar que circula no interior dos tubos (Equação 1):

$$EarthTubeFlowRate = (E_{design})(F_{schedule})[A + B[T_{zone} - T_{odb}] + C(WindSpeed) + D(WindSpeed^2)] \quad (1)$$

Onde:

- $E_{design}$ : é a quantidade máxima da taxa de fluxo de ar expectável nas condições de dimensionamento;
- $F_{schedule}$ : é o parâmetro que altera a taxa de fluxo de ar de acordo com o horário de funcionamento definido para o sistema de tubos;
- $A$ : é uma constante adimensional que não sofre alteração pelos fatores ambientais;
- $B$ : este parâmetro é função dos fatores ambientais e representa a diferença entre as temperaturas de bulbo seco do ar exterior e interior;
- $C$  e  $D$ : são parâmetros que dependem da velocidade do vento no exterior do edifício;

-  $T_{zone}$  e  $T_{odb}$ : termos que representam a diferença entre a temperatura do ar na zona servida pelos tubos enterrados e a temperatura no exterior do edifício.

Para efetuar a modelação de um sistema *EAHE* é necessário, para além de um ficheiro de dados climáticos, introduzir dados referentes à temperatura média à superfície do solo, a amplitude de temperatura da superfície do solo e a constante de fase da temperatura da superfície do solo. Estes dados devem ser calculados previamente, utilizando para tal uma aplicação fornecida em conjunto com o *EnergyPlus*, e só depois devem ser inseridos no modelo. Esta aplicação designa-se por *CalcSoilSurfTemp* e é um programa simples que requer somente um ficheiro climático e dois parâmetros de entrada: as condições do solo em profundidade e as condições do solo à superfície. As opções de escolha para estes dois parâmetros são apresentados na Tabela 2. As condições do solo em profundidade devem corresponder, da forma mais próxima possível, às condições reais do solo na proximidade dos tubos enterrados para que se obtenham valores razoáveis para a difusibilidade térmica e a condutividade térmica do solo. O mesmo acontecendo com as condições do solo à superfície, para que os valores do coeficiente de absorção e da taxa de evaporação na superfície do solo obtidos sejam também adequados. Serão os valores referidos anteriormente que permitirão calcular a quantidade de calor transmitido do solo para o ar que passa no interior dos tubos enterrados.

Tabela 2 – Condições do solo em profundidade e à superfície

<b>Condições do solo em profundidade</b>	Pesado e saturado
	Pesado e húmido
	Pesado e seco
	Leve e seco
<b>Condições do solo à superfície</b>	Descoberto e molhado
	Descoberto e húmido
	Descoberto e árido
	Descoberto e seco
	Coberto e molhado
	Coberto e húmido
	Coberto e árido
	Coberto e seco

Como já foi referido anteriormente, e de acordo com o Manual do *EnergyPlus* (*EnergyPlus*, 2013), a aplicação *CalcSoilSurfTemp* calcula a temperatura média do solo à superfície ( $T_m$ ), a

amplitude da variação da temperatura da superfície do solo ( $A_s$ ) e a constante de fase da temperatura da superfície do solo ( $t_0$ ) recorrendo às equações 2 a 8:

$$T_m = \frac{1}{h_e} [h_r T_{ma} - \varepsilon \Delta R + \beta S_m - 0.0168 h_s f b (1 - r_a)] \quad (2)$$

$$h_s = 5.7 + 3.8u \quad (3)$$

$$h_e = h_s (1 + 0.0168 a f) \quad (4)$$

$$h_r = h_s (1 + 0.0168 a r_a f) \quad (5)$$

$$A_s = \left\| \frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\phi_i}}{(h_e + \delta k_s)} \right\| \quad (6)$$

$$\phi_s = -\text{Arg} \left[ \frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\phi_i}}{h_e + \delta k_s} \right] \quad (7)$$

$$t_0 = t_{0a} + \frac{\phi_s}{w} \quad (8)$$

Onde:

- $h_s$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ );
- $h_e$  e  $h_r$  são coeficientes de convecção calculados admitindo  $a=103\text{Pa}/^\circ\text{C}$  e  $f$  a fração da taxa de evaporação do solo;
- $T_{ma}$  corresponde à temperatura média do ar ( $^\circ\text{C}$ );
- $\varepsilon$  é a emitância hemisférica da superfície do solo (0.93~0.96);
- $\Delta R$  é a constante de radiação ( $63\text{W}/\text{m}^2$ );
- $\beta$  corresponde ao coeficiente de absorção do solo;
- $S_m$  é a média de radiação solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ );
- $b$  é constante;
- $r_a$  é a humidade relativa;
- $u$  é velocidade do vento acima da superfície do solo (m/s);
- $T_{va}$  é a amplitude da temperatura do ar ( $^\circ\text{C}$ );
- $S_v$  é a amplitude da radiação solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ );
- $\phi_i$  corresponde ao ângulo de fase entre a insolação e a temperatura do ar (rad);
- $k_s$  é a condutividade térmica do solo ( $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ );
- $t_{0a}$  corresponde à constante de fase do ar;
- $\phi_s$  é o ângulo de fase da diferença entre a temperatura do ar e a superfície do solo;
- $w$  é a frequência angular anual ( $1.992 \times 10^{-7}$  rad/s).

Determinados os parâmetros  $T_m$ ,  $A_s$  e  $t_0$  e preenchidos os respetivos campos no separador *ZoneEarthtube*, pode-se prosseguir com o preenchimento dos restantes parâmetros responsáveis pela modelação de um tubo enterrado no solo, como se pode observar na Figura 20, referentes à zona que o sistema de tubos fornece o ar, ao caudal de ar de dimensionamento, à pressão e eficiência do ventilador utilizado, às dimensões do tubo e respetiva condutibilidade térmica, bem como à profundidade a que este se encontra enterrado.

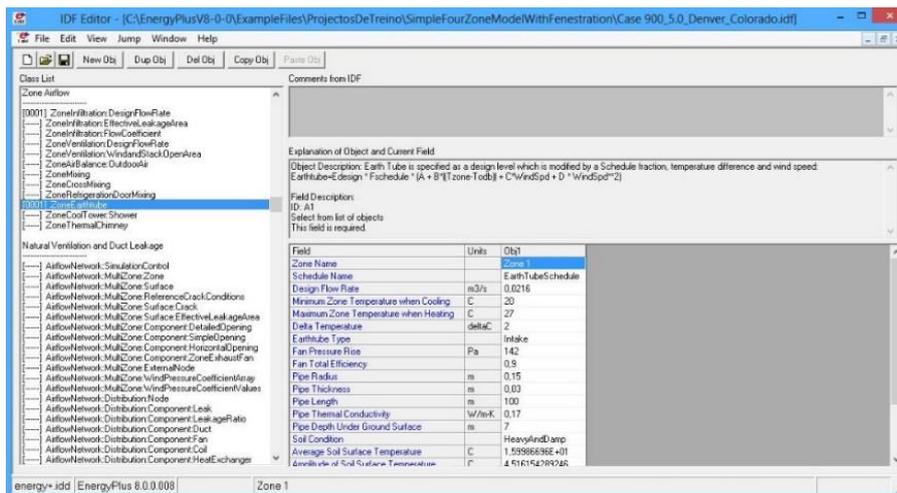


Figura 20 – Interface de modelação do *ZoneEarthtube* no *EnergyPlus*



### **3. Metodologias**

#### **3.1. Metodologia do Estudo Paramétrico**

##### **3.1.1. Enquadramento**

O principal objetivo deste estudo é avaliar a aplicabilidade de sistemas de ventilação com permutador de calor ar-solo no clima português e comparar os resultados energéticos com um sistema convencional de ventilação, indicado como sendo um equipamento padrão pelo RCCTE, num ambiente doméstico. Pode-se então assumir que o estudo paramétrico será dividido em três fases distintas: modelação do edifício base e estudo do seu comportamento energético, integração do sistema de permutador de calor ar-solo e realização de um estudo paramétrico do seu desempenho energético, no qual se avaliou a influência do comprimento, do diâmetro, da profundidade e do material do tubo enterrado e, por último, apresentam-se os resultados da comparação direta entre o sistema de ventilação convencional e o híbrido, indicando ainda as poupanças de energia proporcionadas por cada variação de parâmetros estudada.

No decorrer do estudo paramétrico acima referido estudaram-se os impactos da variação do comprimento do tubo, do diâmetro, do tipo de material que o constitui e da profundidade a que este se encontrava enterrado. Os parâmetros analisados no estudo paramétrico foram escolhidos devido, essencialmente, à sua influência direta no desempenho energético do sistema. Optou-se, portanto, não estudar os impactos que o tipo de solo, o nível de saturação e as condições de cobertura da superfície do solo podem provocar no sistema, pelo simples facto de serem bastante variáveis ao longo de todo o território português e até mesmo ao longo do ano. Assim, ao considerar uma constituição tipo do solo português pode-se estimar de uma forma mais simples a influência dos parâmetros de dimensionamento intrínsecos aos permutadores de calor ar-solo ao interagirem com as variações de temperatura do ar exterior ao longo do ano. Não quer isto dizer que a constituição física e as condições do solo são desprezáveis, porque não o são, mas a intenção é estudar os parâmetros diretamente ligados à constituição do tubo enterrado.

Por último, irão ser apresentados e discutidos os resultados para cada parâmetro do estudo paramétrico, sempre com o objetivo de demonstrar a quantidade de poupança de energia gasta na manutenção das condições de conforto térmico do edifício que cada parâmetro é capaz de produzir. Pretende-se assim obter uma solução para o binómio energia poupada/sistema adotado.

Para efeitos de localização geográfica do ficheiro climático a introduzir no *EnergyPlus*, foi considerada a localização na cidade do Porto, Portugal. Segundo o ficheiro climático disponibilizado pelo *United States Department of Energy* para introdução no *EnergyPlus*, a cidade do Porto encontra-se situada a 41,13° de latitude, -8,40° de longitude e 73 metros acima do nível do mar. Relativamente às temperaturas, o *software* considera que as médias anuais encontram-se compreendidas entre os 1,9° e os 32,0°C.

### **3.1.2. Descrição da célula de teste**

Devido à proliferação de programas informáticos de simulação do comportamento energético dos edifícios, começou a surgir a dúvida de quais seriam os programas que apresentam resultados mais fiáveis. Como forma de resposta a esta questão, a *ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers)* publicou em 2001 a Norma 140-2001 designada *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*. Esta norma estabeleceu um método de análise e de diagnóstico das simulações energéticas de edifícios efetuadas pelos vários programas existentes e, para tal, adotou uma série de possibilidades construídas a partir de um mesmo modelo, designado *Base Case*. Este modelo base consiste num edifício térreo de inércia térmica fraca, de forma retangular, constituído por uma única zona térmica climatizada e com dimensões estipuladas. Os restantes modelos de teste definem soluções construtivas para casos com inércia térmica forte, sem sistema de climatização ou para a análise comportamental de sistemas de climatização diferentes do estipulado.

Para a realização do estudo paramétrico foi selecionado o modelo Case 900 – *Base Case High Mass Building*. Este modelo utiliza as mesmas configurações descritas na Secção 5.2.1 da Norma *ASHRAE 140-2001*, onde é descrito o referido caso base, à exceção das soluções construtivas das paredes e do pavimento, que foram alteradas para soluções que utilizam materiais mais pesados. Esta solução foi tomada no sentido de tentar aproximar os resultados das simulações energéticas à realidade construtiva portuguesa, onde é comum serem utilizados elementos estruturais em betão armado e paredes em alvenaria de tijolo.

Como se pode observar na Figura 21, o modelo da célula de teste consiste num edifício retangular com as seguintes medidas interiores: 8 metros de comprimento, 6 metros de largura e 2,70 metros de altura, o que perfaz um volume interior fixo igual a 129,6 metros cúbicos. Como as medidas apresentadas pela norma americana são fixas, isso significa que, independentemente do modelo escolhido e das soluções construtivas a adotar, as dimensões terão de ser dadas a partir do interior.

Não são consideradas quaisquer paredes divisórias ou mobiliário no interior do edifício e a fachada orientada a sul possui 12 metros quadrados de envidraçados, divididos em duas janelas de iguais dimensões, sem dispositivos de sombreamento e sem proteções opacas.

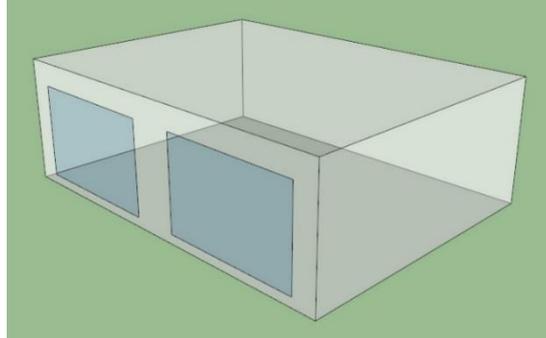


Figura 21 – Modelo da célula de teste, em vista isométrica, desenhado no *Google SketchUp*

### 3.1.2.1. Definição das soluções construtivas

Tal como já foi referido anteriormente, as soluções construtivas adotadas para a célula de teste utilizada no estudo paramétrico foram as apresentadas para o modelo *Case 900 – Base Case High Mass Building*. Neste modelo, são utilizadas soluções para as paredes exteriores e para o pavimento mais pesadas, tal como se pode observar na Tabela 3. Os elementos de cada solução construtiva foram introduzidos na referida tabela de forma que o primeiro a ser descrito seja o que está em contacto com o ambiente interior e o último seja o elemento que está em contacto com o ambiente exterior. Assim, tomando como exemplo os elementos construtivos das paredes, o bloco de betão (primeiro) é o elemento que se encontra em contacto com o ambiente interior, o isolante térmico é o elemento intermédio e o revestimento em madeira (último) encontra-se em contacto com o ambiente exterior.

É ainda de salientar que todos os materiais considerados para a construção do modelo são materiais genéricos que correspondem às soluções mais convencionais existentes no mercado de construção norte-americano, sem serem associados a uma marca específica ou a um tipo de construção inovador.

Tabela 3 – Soluções construtivas adotadas para a célula de teste

<b>Construção das Paredes</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Espessura [m]</b>	<b>Condutividade Térmica [W/m-K]</b>	<b>Densidade [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Calor Específico [J/kg-K]</b>
Bloco de Betão	0,10	0,51	1400	1000
Isolante Térmico	0,0615	0,04	10	1400
Revestimento em Madeira	0,009	0,14	530	900
<b>Construção do Pavimento</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Espessura [m]</b>	<b>Condutividade Térmica [W/m-K]</b>	<b>Densidade [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Calor Específico [J/kg-K]</b>
Laje em Betão	0,08	1,13	1400	1000
Isolante Térmico	1,007	0,040	10	1400
<b>Construção da Cobertura</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Espessura [m]</b>	<b>Condutividade Térmica [W/m-K]</b>	<b>Densidade [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Calor Específico [J/kg-K]</b>
Placa de Gesso Cartonado	0,01	0,160	950	840
Manta de Fibra de Vidro	0,1118	0,040	12	840
Roof Deck	0,019	0,140	530	900

Relativamente à solução construtiva dos envidraçados, a Norma *ASHRAE* 140-2001 indica que estes devem ser modelados em concordância com os valores apresentados na Tabela 4. Os envidraçados são constituídos por um duplo pano de vidro corrente com espessura de 3mm cada, separados por uma caixa-de-ar com uma espessura de 13mm. Estes valores podem também ser adotados a partir da base de dados de materiais que é disponibilizada juntamente com o *EnergyPlus*, os quais se designam por “Clear 3mm” e “Air 13mm” para as soluções do vidro e da caixa-de-ar, respetivamente.

Tabela 4 – Solução construtiva dos envidraçados adotada para a célula de teste

<b>Características dos Envidraçados</b>	
Espessura [m]	0.003175
Transmitância solar na incidência normal	0.86156
Reflectância solar frontal na incidência normal	0.07846
Reflectância solar traseira na incidência normal	0.07846
Transmitância visível na incidência normal	0.91325
Reflectância frontal visível na incidência normal	0.082
Reflectância traseira visível na incidência normal	0.082
Transmitância infravermelha na incidência normal	0
Emissividade hemisférica infravermelha frontal	0.84
Emissividade hemisférica infravermelha traseira	0.84
Condutibilidade térmica [W/m.K]	1.06

### 3.1.2.2. Definição do sistema de climatização

O sistema de climatização adotado para a célula de teste não é o descrito na Norma ASHRAE 140, mas antes o sistema convencional proposto pelo RCCTE para a determinação das necessidades globais anuais nominais específicas de energia primária ( $Ntc$ ). Esta opção foi tomada porque o sistema indicado na norma americana consiste num terminal conjunto de ar condicionado com um sistema de aquecimento por água quente – os chamados *Package Terminal Air Conditioner* (*PTAC* na designação anglo-saxónica), equipamento que não é comum em Portugal. Por esse motivo, não faria sentido modelar um sistema de climatização que, por não ser semelhante ao mais utilizado convencionalmente, poderia não reproduzir necessidades energéticas comparáveis às reais. Foi então consultado o RCCTE e desenvolvido um modelo de climatização constituído por uma bomba de calor (ou máquina frigorífica) para funcionar na estação de arrefecimento e uma resistência elétrica para a estação de aquecimento.

Uma bomba de calor funciona segundo o princípio de transferência de calor de uma fonte fria para uma fonte quente, ou vice-versa, recorrendo à utilização de um líquido refrigerante que condensa na fonte fria e evapora na fonte quente. Chama-se a este processo termodinâmico o ciclo frigorífico.

Os principais elementos mecânicos que constituem este ciclo são: o evaporador, o compressor, o condensador e a válvula de expansão. Como as bombas de calor exploram e aproveitam as propriedades físicas dos ciclos de condensação-ebulição necessitam de um fluido volátil para o seu funcionamento, normalmente designado por fluido refrigerante. Este tem de ter capacidade de atingir temperaturas suficientemente altas quando comprimido e baixas quando expandido. Só assim é que se conseguem transferir cargas térmicas consideráveis do ar insuflado do interior dos edifícios para o fluido refrigerante, visto que quanto maiores forem as diferenças de temperatura, maiores serão as diferenças de pressão necessárias. Por conseguinte, os consumos energéticos serão diretamente proporcionais às diferenças de pressão criadas, na medida em que é através da energia elétrica que se cria o trabalho necessário à compressão do refrigerante. Tal como já foi comprovado, o coeficiente de desempenho (COP) decresce com o aumento da diferença de temperatura imposta no funcionamento do sistema.

A grande maioria das bombas de calor estão providas de uma válvula de comutação reversível que permite a inversão do sentido de circulação do fluido refrigerante, originando assim dois ciclos de funcionamento possíveis: ciclo de aquecimento e ciclo de arrefecimento. O ciclo de aquecimento é obtido quando o fluido refrigerante é mantido a uma temperatura superior à do ar interior insuflado, fornecendo continuamente calor a este último, e diz-se, por isso, que o sistema está a funcionar como uma bomba de calor. Por outro lado, quando o fluido refrigerante é mantido a uma temperatura inferior à do ar interior insuflado e absorve continuamente calor, diz-se que o sistema está a funcionar como uma máquina frigorífica. Esta dupla capacidade de climatização, aquecimento e arrefecimento, permite poupanças ao nível de aquisição de equipamentos e ao nível de consumos energéticos.

Quando o funcionamento deste sistema consiste em controlar a temperatura de uma zona, a quantidade de calor retirada ou adicionada ao fluxo de ar que atravessa o equipamento, depende da componente sensível da carga térmica que é necessária remover ou adicionar. Como se pode observar no esquema da Figura 22, no processo de arrefecimento o fluido refrigerante no estado gasoso é pressurizado e vaporizado por um compressor onde, no lado de descarregamento do compressor, o vapor apresenta elevadas pressões e temperaturas. Ao percorrer o circuito de tubos termicamente isolados do condensador, o vapor vai sendo arrefecido e condensado até se tornar num líquido altamente pressurizado de temperatura moderada. Depois de passar por uma válvula de expansão a pressão do fluido desce abruptamente e, à medida que circula no evaporador e vai absorvendo calor, a sua temperatura vai aumentando gradualmente até entrar em ebulição e passar novamente pelo compressor, repetindo-se assim o ciclo termodinâmico.

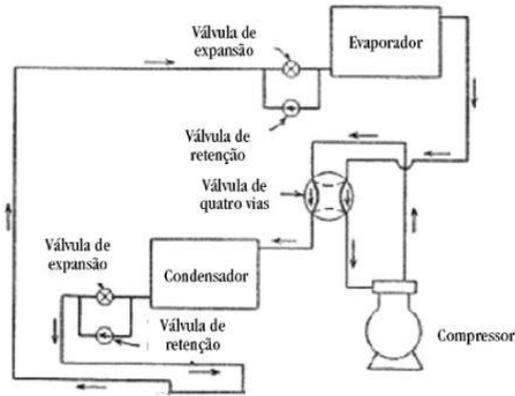


Figura 22 – Esquema exemplificativo do funcionamento de uma máquina frigorífica (Reabilitação e Manutenção de Edifícios, 2013)

O sistema de arrefecimento por máquina frigorífica utilizado no estudo paramétrico foi dimensionado com o valor de COP igual a 3.0, tal como indicado no RCCTE e funciona sempre que a temperatura do ar no interior do edifício ultrapassa os 25°C.

Como já foi referido anteriormente, o equipamento selecionado para suprir as necessidades de aquecimento foi um sistema convectivo por resistência elétrica. Os equipamentos de aquecimento por resistência elétrica convertem aproximadamente 100% da energia elétrica consumida em calor e podem ser de dois tipos distintos: unidades individuais localizadas em cada zona térmica ou abastecidos a partir de caldeiras elétricas centralizadas com um circuito de ar isolado (*EnergyPlus*, 2013). Neste trabalho irá apenas ser abordado o primeiro caso, por ser o mais convencional. Dentro da vasta gama de possibilidades de equipamentos disponíveis e, unicamente pelo motivo de facilidade de dimensionamento no *software EnergyPlus*, foi considerado um sistema de aquecimento elétrico aplicado no rodapé – Figura 23.



Figura 23 – Imagem exemplificativa de um aquecedor elétrico de rodapé (*HAP*, 2013)

À semelhança do que acontece com os outros aquecedores elétricos, os de rodapé são controlados através de um termostato que ativa ou desativa o funcionamento do equipamento de acordo com a temperatura do ar da zona onde está colocado. Os elementos de aquecimento elétrico encontram-se enclausurados no interior de tubos metálicos, que por sua vez podem ser rodeados por tiras de alumínio para melhorar o processo de transferência de calor.

Estes equipamentos são normalmente instalados por baixo de janelas para que o ciclo convectivo do ar seja mais eficaz, tal como se pode observar na Figura 24. Assim, o ar mais frio que se infiltra pelo perímetro do vão envidraçado é aquecido pelo ar que sai do aquecedor e, como este é menos denso que o ar mais frio tem tendência para subir. Com o aumento da distância ao aquecedor verifica-se uma diminuição da temperatura que torna o ar mais denso e com tendência para descer sob o ar quente. Ao descer, o ar arrefecido reencaminha-se para o aquecedor onde é novamente aquecido, dando assim início a um novo ciclo convectivo.

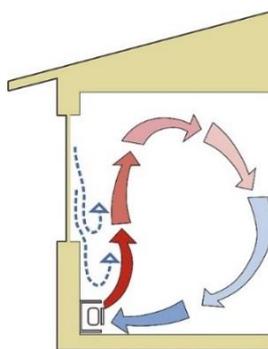


Figura 24 – Esquema exemplificativo da colocação de um aquecedor elétrico de rodapé (SRM, 2013)

Convém ainda salientar que, por norma, este tipo de aquecedores são colocados a uma altura mínima de 2 centímetros acima do chão para facilitar a circulação do ar arrefecido à entrada e são fixos diretamente nas paredes para evitar que o ar aquecido se desloque para trás do aquecedor.

Por último, e de acordo com o RCCTE, o sistema de aquecimento por resistência elétrica utilizado no estudo paramétrico foi dimensionado com um valor de eficiência energética de 1.0 e funciona sempre que a temperatura do ar no interior da célula desce abaixo dos 20°C.

### 3.1.2.3. Definição dos parâmetros climáticos

Segundo as informações presentes no ficheiro climático para a cidade do Porto, a temperatura mínima de bulbo seco com o valor mais baixo do ano, 0,0°C, verifica-se no dia 1 de Janeiro e, por sua vez, a temperatura máxima de bulbo seco com o valor mais alto do ano, 32,0°C, é registada no decorrer do dia 6 de Julho. Estes valores representam os extremos da temperatura do ar exterior ao longo do ano podendo, de uma forma pragmática, assumir-se que as temperaturas típicas no Porto variam entre os 0,0 e os 32,0°C.

Como já foi referido, um dos objetivos do estudo paramétrico é analisar a aplicabilidade dos sistemas *EAHE* em Portugal. Como tal, torna-se interessante perceber e quantificar o desempenho do sistema não só num contexto anual, como também para os dias mais frio e quente do ano. Assim, compreendido o desempenho do sistema para os dias mais significativos do ano, pode-se determinar de uma forma mais precisa a poupança obtida anualmente. Ao analisar os dados do ficheiro climático para a cidade de Porto, nomeadamente as temperaturas médias diárias, podemos concluir que o dia mais frio do ano é o dia 2 de Janeiro e o dia mais quente do ano é o dia 10 de Agosto. Nas Figuras 25 e 26 são apresentadas as variações de temperatura para os dias mais frio e mais quente, respetivamente.

E por último, a variação da temperatura do ar exterior, ao longo do ano, na cidade do Porto é apresentada na Figura 27, juntamente com as temperaturas do solo para as profundidades de 0,50, 2,0 e 4,0 metros disponíveis no referido ficheiro climático. Os valores de temperaturas considerados são os valores médios mensais.

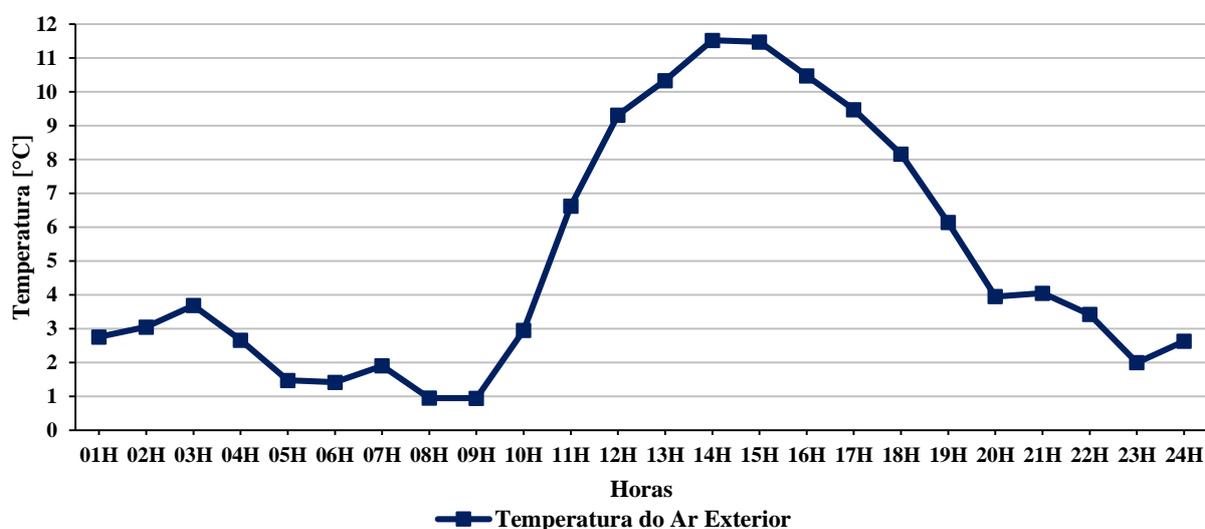


Figura 25 – Variação da temperatura do ar exterior no dia 2 de Janeiro

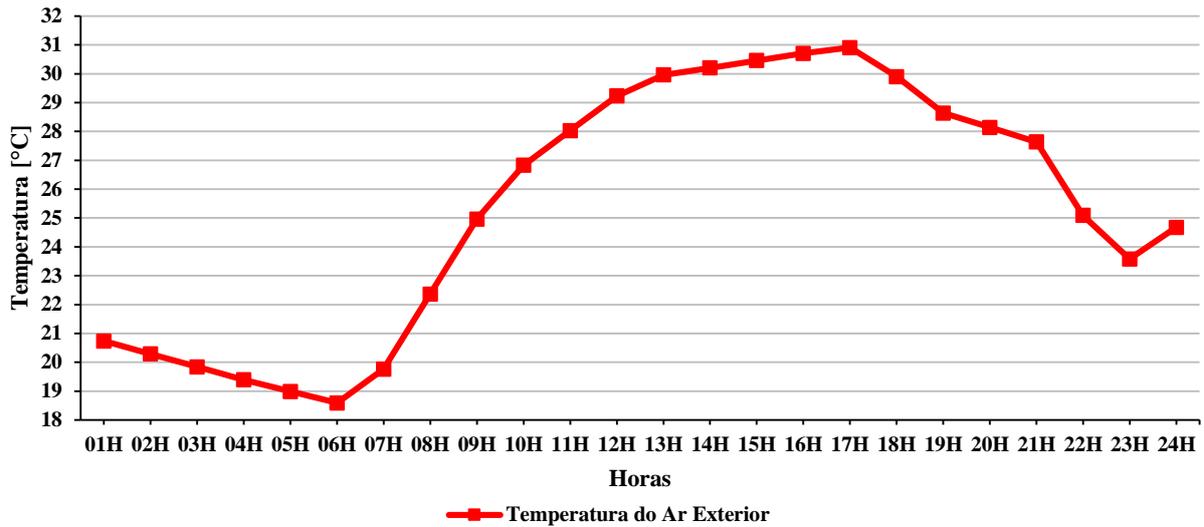


Figura 26 – Variação da temperatura do ar exterior no dia 10 de Agosto

### 3.1.2.4. Definição do tipo de solo

Como se pode observar no gráfico da Figura 27, as temperaturas do solo em profundidade apresentam variações mais pequenas, relativamente à temperatura do ar exterior e das camadas mais superficiais. Partindo ainda da análise do gráfico, pode-se prever que o rendimento dos permutadores de calor ar-solo será mais elevado a profundidades compreendidas entre os 2 e os 4 metros de profundidade, devido à menor amplitude anual da temperatura do solo.

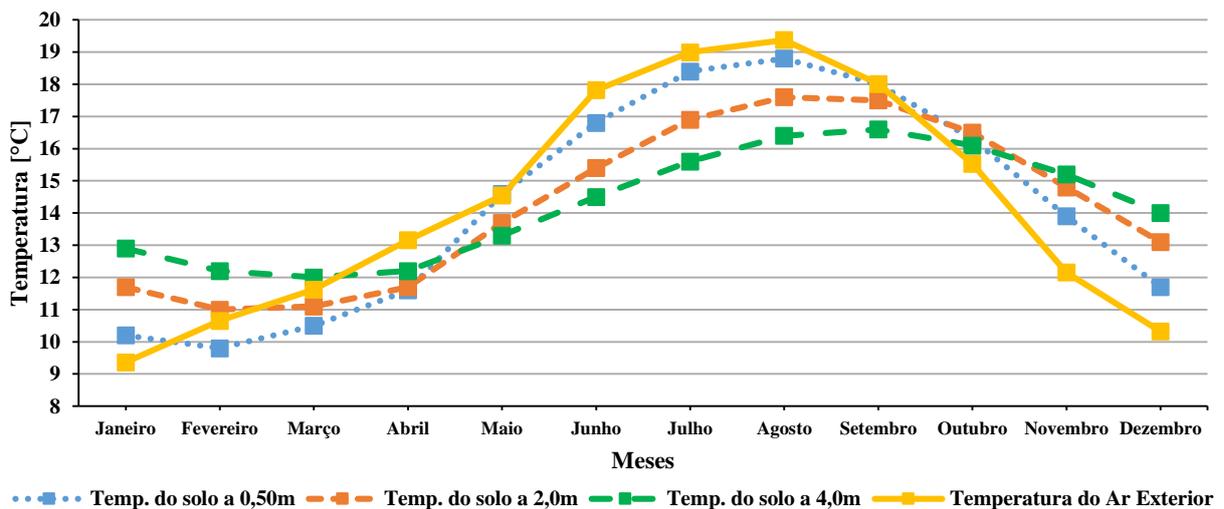


Figura 27 – Variação da temperatura do ar exterior e do solo na cidade do Porto

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios mensais das temperaturas do solo, em várias profundidades, e do ar exterior utilizados para a construção do gráfico da Figura 27. É de salientar que os valores de temperatura no solo foram obtidos considerando uma difusividade com o valor de  $2,3225760 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{dia}$ , valor médio especificado pelo *United States Department of Energy* para o solo da cidade do Porto.

Tabela 5 – Variação das temperaturas médias mensais do ar exterior e do solo na cidade do Porto

Meses	Temperatura do Solo em Profundidade [°C]			Temperatura do Ar Exterior [°C]
	0,50m	2,00m	4,00m	
<b>Janeiro</b>	10,2	11,7	12,9	9,4
<b>Fevereiro</b>	9,8	11,0	12,2	10,7
<b>Março</b>	10,5	11,1	12,0	11,6
<b>Abril</b>	11,6	11,7	12,2	13,2
<b>Maio</b>	14,6	13,7	13,3	14,5
<b>Junho</b>	16,8	15,4	14,5	17,8
<b>Julho</b>	18,4	16,9	15,6	19,0
<b>Agosto</b>	18,8	17,6	16,4	19,4
<b>Setembro</b>	18,0	17,5	16,6	18,0
<b>Outubro</b>	16,3	16,5	16,1	15,5
<b>Novembro</b>	13,9	14,8	15,2	12,2
<b>Dezembro</b>	11,7	13,1	14,0	10,3

Os parâmetros de dimensionamento do sistema de permutador de calor ar-solo relativos à temperatura média anual da superfície do solo, à amplitude de temperaturas na superfície do solo e à constante de fase da temperatura da superfície do solo, todos eles fornecidos pela aplicação *CalcSoilSurfTemp*, foram determinados considerando que o solo à superfície encontra-se coberto e húmido e que em profundidade é pesado e húmido. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Temperatura média anual da superfície do solo: 15,998669624329 °C
- Amplitude de temperaturas na superfície do solo: 4,516154289246 °C
- Constante de fase da temperatura da superfície do solo: 30 dias

### 3.1.2.5. Definição do sistema de permutador de calor ar-solo

Partindo do princípio que um dos objetivos do estudo paramétrico é precisamente analisar a influência do tipo de material que constitui o sistema de permutador de calor ar-solo, irão ser definidos três tipos de materiais diferentes para a constituição dos tubos enterrados. A escolha dos materiais utilizados teve em conta, tanto estudos semelhantes realizados anteriormente, como também os materiais tubulares mais utilizados em Portugal. Assim, após a consulta da bibliografia disponível, decidiu-se utilizar um tubo metálico construído em aço inoxidável, um de betão e um em policloreto de vinilo (PVC). Todos os tubos podem ser considerados como genéricos, visto que se encontram disponíveis no mercado e as características físicas da constituição de cada um seguiram a linha do que é considerado como convencional. Estas podem ser consultadas na Tabela 6, apresentada de seguida.

Tabela 6 – Características físicas dos tubos enterrados

<b>Tubo de aço inoxidável</b>		
<b>Espessura [m]</b>	<b>Diâmetro [m]</b>	<b>Condutividade Térmica [W/m-K]</b>
0,005	0,30	50,0
<b>Tubo de betão</b>		
<b>Espessura [m]</b>	<b>Diâmetro [m]</b>	<b>Condutividade Térmica [W/m-K]</b>
0,003	0,30	2,0
<b>Tubo de PVC</b>		
<b>Espessura [m]</b>	<b>Diâmetro [m]</b>	<b>Condutividade Térmica [W/m-K]</b>
0,003	0,30	0,17

Como já foi referido anteriormente, o caudal de ar que circula no interior do sistema de tubos enterrados influencia significativamente a eficiência geral do permutador de calor ar-solo. Bansal *et al.* (2010) investigaram a análise da performance de um sistema *EAHE* na estação do verão na Índia e concluíram que a performance do sistema não é maioritariamente afetada pelo tipo de material do tubo, mas sim pela velocidade do fluído. O caudal de ar deve ser dimensionado com atenção porque se for elevado, para além de causar um possível desconforto nos ocupantes devido a correntes de ar e a sobreaquecimento ou sobrearrefecimento, também não permite que seja

realizada uma troca eficiente de calor entre o ar e o solo. Pelo contrário, se o caudal for demasiado reduzido não causa o efeito térmico pretendido.

Por conseguinte, o caudal de ar adotado para a realização do estudo paramétrico foi dimensionado por forma a realizar uma renovação do volume de ar no interior da célula a uma taxa mínima de 0,60 renovações horárias nas situações de temperatura exterior mais desfavoráveis e de 1,00 nas restantes. Assim, considerando o volume interior da célula de teste igual a  $129,60\text{m}^3$ , então o caudal de ar insuflado através dos tubos enterrados será igual a  $0,0216\text{m}^3/\text{s}$  e a  $0,0360\text{m}^3/\text{s}$  para as situações mais desfavoráveis e mais favoráveis, respetivamente. Desta forma, pretende-se maximizar o aproveitamento das flutuações de temperatura do ar exterior para reduzir ao máximo o funcionamento do sistema de climatização. Como se pode observar na Tabela 7, nas estações da primavera e do verão o sistema de permutador de calor ar-solo tem um funcionamento mais intenso no período noturno para reduzir a carga térmica do edifício, enquanto nas estações do outono e inverno é mantido um caudal de insuflação constante para minimizar a ocorrência provável de sobrearrefecimento.

Tabela 7 – Esquema de funcionamento do permutador de calor ar-solo

<b>Estação</b>	<b>Horário</b>	<b>Taxa de Renovações Horárias</b>
Primavera	00:00H – 09:00H	1,00
	09:00H – 22:00H	0,60
	22:00H – 24:00H	1,00
Verão	00:00H – 09:00H	1,00
	09:00H – 22:00H	0,60
	22:00H – 24:00H	1,00
Outono	00:00H – 24:00H	0,60
Inverno	00:00H – 24:00H	0,60

Para além do caudal de ar insuflado, também o termóstato do sistema *EAHE* foi calibrado para maximizar o funcionamento de todo o sistema. Assim, o sistema foi dimensionado para funcionar num intervalo de temperaturas do ar interior entre os 20 e os 27°C e sempre que a diferença de temperaturas de bulbo seco do ar interior e exterior for maior ou igual a 2°C. Garante-se assim que o sistema de tubos enterrados só efetua ventilação sempre que haja uma diferença de temperaturas entre o ar exterior e o interior, evitando a possibilidade de ocorrência de sobreaquecimento ou sobrearrefecimento do ambiente habitável.

### 3.1.3. Descrição dos parâmetros estudados

No decorrer do estudo paramétrico foram avaliadas as influências de parâmetros do sistema *EAHE* relativas à variação do comprimento, do diâmetro, da profundidade e do tipo de material do tubo enterrado. Na variação de comprimento foram considerados os valores de 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 e 200 metros. Os valores escolhidos apresentam um espaçamento que vai de encontro ao que é tipicamente considerado noutros estudos do género. Além disso, os intervalos escolhidos permitem estabelecer uma correlação aproximada do desempenho do sistema *EAHE* nos valores intermédios que não foram estudados, bem como possibilitam uma perspetiva gradual da influência que o aumento do comprimento tem no desempenho do referido sistema. Relativamente à variação do diâmetro, os valores considerados nas várias simulações encontram-se compreendidos numa gama de valores entre os 0,20 e 1,00 metros, com variações crescentes de 0,10 metros. Os valores foram escolhidos de acordo com a gama normalmente avaliada em trabalhos semelhantes, bem como representam os diâmetros normalmente disponibilizados no mercado português. Por último, foram avaliadas profundidades para o tubo enterrado compreendidas entre os 0,50 e os 7,00 metros com variações crescentes de 0,50 metros. Pretende-se desta forma caracterizar de uma forma assertiva a influência da profundidade no desempenho geral do sistema, bem como estabelecer uma relação custo-benefício, visto que o preço das escavações de valas para os tubos assumem uma percentagem significativa dos custos de instalação.

Para cada variação do parâmetro em análise, tiveram de se estipular outros dois valores para efetuar as simulações energéticas. Ou seja, quando se avaliou a influência da variação do comprimento do tubo enterrado no desempenho do sistema de ventilação, foram fixados os valores da profundidade e diâmetro do tubo a aplicar nas simulações energéticas. De forma idêntica, quando se analisou a influência da variação do diâmetro fixou-se o comprimento e a profundidade do tubo e quando se estudou a influência da variação da profundidade, fixaram-se os valores do comprimento e do diâmetro do tubo. O estabelecimento dos parâmetros “fixos” para cada análise dos diferentes parâmetros teve por base a bibliografia disponível e aproximou-se ao que é mais comum considerar.

## **3.2. Metodologia do caso de estudo - *Wee Building***

### **3.2.1. Enquadramento**

Com o objetivo de compreender melhor de que forma os parâmetros dos permutadores de calor ar-solo estudados anteriormente, como o comprimento, o diâmetro, o material e a profundidade do tubo influenciam os consumos energéticos de um edifício, efetuar-se-á de seguida uma aplicação a um caso real. Para tal, vai ser dimensionado e modelado um edifício mais próximo do contexto real, no qual se irá posteriormente integrar um permutador de calor ar-solo no sistema de climatização e analisar o seu benefício nos consumos energéticos de aquecimento e arrefecimento. O edifício modelado vai ser sujeito a um conjunto de simulações energéticas para as localizações de Bragança, Évora, Lisboa e Porto por forma a avaliar o seu comportamento térmico quando sujeito ao clima de diferentes zonas climáticas. Em adição, irá também ser efetuada uma análise de custos orçamentais e de síntese financeira.

### **3.2.2. Descrição do edifício em estudo**

O edifício escolhido para a aplicação dos conhecimentos obtidos no estudo paramétrico foi o chamado *Wee Building*, o qual foi concebido de raiz para diminuir as trocas de calor com o ambiente exterior e, assim, ser mais eficiente e sustentável em termos energéticos. Este edifício possui algumas soluções simples, tais como a elevada percentagem de envidraçados orientados no quadrante sul, todos eles com elementos de sombreamento, e a reduzida quantidade de envidraçados nos restantes quadrantes, a utilização abundante de isolamento térmico na envolvente exterior, bem como a seleção criteriosa dos materiais constituintes de todos os elementos construtivos.

O espaço no jardim, destinado à colocação dos tubos enterrados, possui uma cobertura de relva normal e sem qualquer elemento de sombreamento, tal como árvores, arbustos ou outros edifícios.

#### **3.2.2.1. Definição da arquitetura**

Como se pode observar na Figura 28, o referido edifício consiste numa moradia unifamiliar de tipologia T4 e apresenta um aspeto relativamente normal, quando modelado no programa

informático *Google SketchUp*. Este edifício é constituído por dois pisos (o rés-do-chão e o primeiro andar) e um sótão, que no seu total perfazem uma área bruta de construção de 236,20 m<sup>2</sup> divididos em 116,80 m<sup>2</sup> do rés-do-chão e 119,40 m<sup>2</sup> do primeiro piso. Todas as divisões possuem um pé-direito de 2,70 metros.



Figura 28 – Perspetiva isométrica do *Wee Building* no software *Google SketchUp*

Na Figuras 29 e 30 são apresentadas as plantas dos pisos do Rés-do-Chão e do Piso 1, respetivamente, com as designações de cada divisão e as respetivas áreas úteis.

Como se pode observar na Figura 29, o piso do rés-do-chão do *Wee Building* encontra-se dividido em cinco divisões distintas, correspondendo cada uma delas a uma zona térmica diferente: o hall do rés-do-chão (Hall do RC), o escritório, a sala de estar, a cozinha e a casa de banho do rés-do-chão (WC do RC). As áreas úteis de cada uma delas são, respetivamente, 20,66 m<sup>2</sup>, 12,56 m<sup>2</sup>, 43,23 m<sup>2</sup>, 20,78 m<sup>2</sup> e 4,49 m<sup>2</sup>.

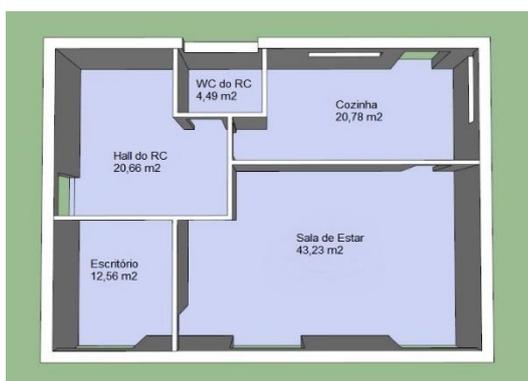


Figura 29 – Planta do Rés-do-Chão do *Wee Building* no software *Google SketchUp*

Na Figura 30 é apresentada a planta do Piso 1 do *Wee Building*, na qual se representam as diversas divisões existentes e que correspondem, cada uma delas, a uma zona térmica individual. Como se pode observar na figura abaixo, o primeiro piso encontra-se dividido no hall de distribuição

(Hall do Piso 1), em dois quartos (Quarto 1 e Quarto 2), a suite, o quarto de vestir, a casa de banho da suite (WC da Suite) e na casa de banho do primeiro piso (WC do Piso 1). As áreas úteis de cada divisão são, respetivamente, 15,30 m<sup>2</sup>, 16,61 m<sup>2</sup>, 18,26 m<sup>2</sup>, 31,80 m<sup>2</sup>, 9,82 m<sup>2</sup>, 4,80 m<sup>2</sup> e 6,84 m<sup>2</sup>.

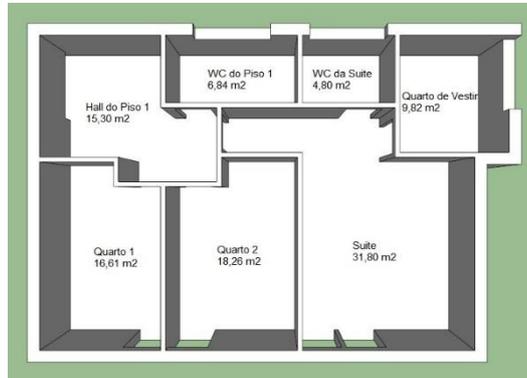


Figura 30 – Planta do Piso 1 do *Wee Building* no *software Google SketchUp*

### 3.2.2.2. Definição das soluções construtivas

Tal como foi referido anteriormente, o *Wee Building* foi concebido de raiz com o objetivo de incorporar soluções que permitissem a minimização do consumo não só de energia, como também de água, para ser mais eficiente e sustentável num conjunto variado de indicadores de sustentabilidade. Assim, as soluções construtivas dos mais diversos elementos foram criteriosamente selecionadas para maximizar esse objetivo. Na Tabela 8 são apresentados os materiais utilizados na modelação do *Wee Building* e as respetivas propriedades físicas introduzidas no *software EnergyPlus*. A descrição de cada solução construtiva, de acordo com os materiais utilizados, é apresentada na Tabela 9. Nesta tabela são referidos os números referentes à ordenação de materiais considerada na Tabela 8, como forma de simplificar o processo de apresentação da constituição das soluções construtivas. Além disso, os elementos construtivos são sempre apresentados de forma que o primeiro material indicado seja o que está em contacto com o ambiente exterior e o último aquele que está em contacto com o interior, no caso de elementos que fazem a ligação entre o interior e o exterior. Para os elementos horizontais que separam duas divisões interiores é sempre apresentado em primeiro lugar o elemento em contacto com a divisão do piso superior e em último o elemento em contacto com o piso inferior. Já no caso das coberturas, é apresentado em primeiro lugar o material que está em contacto com o ambiente exterior, avançando consecutivamente para o material em contacto com o ambiente interior.

Tabela 8 - Materiais e respectivas características físicas dos materiais construtivos do *Wee Building*

<b>Materiais construtivos aplicados no <i>Wee Building</i></b>					
<b>Material</b>	<b>Espessura [m]</b>	<b>Condutividade Térmica [W/m-K]</b>	<b>Densidade [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Calor Específico [J/kg-K]</b>	<b>Resistência Térmica [m<sup>2</sup>-K/W]</b>
1. Alvenaria de Granito	0,11	2,80	2600	775	
2. Alvenaria em Tijolo Furado	0,11	-	1470	960	0,27
3. Alvenaria em Tijolo Furado	0,22	-	1470	960	0,52
4. Betonilha de Regularização	0,10	1,30	1900	800	-
5. Betonilha de Regularização	0,02	1,30	1900	800	-
6. Chapa de Zinco	0,002	110,0	7200	550	-
7. Estrutura Descontínua em Madeira	0,01	0,23	810	800	-
8. Estuque projetado	0,02	0,30	750	1085	-
9. Gravelha	0,10	2,0	1950	700	-
10. Isolante Térmico EPS	0,10	0,042	14	1210	-
11. Isolante Térmico XPS	0,10	0,037	32,50	1210	-
12. Isolante Térmico XPS	0,05	0,037	32,50	1210	-
13. Lã de Rocha	0,02	0,040	67,50	840	-
14. Laje em Betão Armado	0,175	2,0	2450	1000	-
15. Lajetas de Betão	0,02	2,0	2450	1000	-
16. Malha Geotêxtil	0,01	0,22	910	900	-
17. Reboco Armado	0,03	2,0	2300	900	-
18. Reboco de Argamassa de Cimento	0,02	1,30	1900	900	-
19. Revestimento em Grés Porcelânico	0,01	1,30	2300	830	-
20. Revestimento em Soalho	0,01	0,23	610	800	-
21. Tela Impermeabilizante	0,01	0,23	1050	900	-
22. Telha Lisa	0,01	0,60	1500	960	-

Tabela 9 - Descrição das soluções construtivas por materiais

<b>Soluções construtivas utilizadas no <i>Wee Building</i></b>	
<b>Solução Construtiva</b>	<b>Material</b>
Parede Exterior com Granito	1 - 11 - 2 - 8
Parede Exterior com Zinco	6 - 17 - 11 - 3 - 8
Parede Exterior Simples	18 - 11 - 3 - 8
Parede Interior	8 - 2 - 8
Laje de Piso Térreo com Revestimento em Grés Cerâmico	9 - 4 - 21 - 14 - 12 - 5 - 19
Laje de Piso Térreo com Revestimento em Soalho	9 - 4 - 21 - 14 - 12 - 5 - 20
Laje de Piso Intermédio com Revestimento em Grés Cerâmico	19 - 5 - 13 - 14 - 8
Laje de Piso Intermédio com Revestimento em Soalho	20 - 5 - 13 - 14 - 8
Murete da Cobertura	6 - 17 - 11 - 2 - 10 - 17 - 6
Cobertura Horizontal	15 - 16 - 21 - 12 - 5 - 14 - 8
Cobertura Inclinada	22 - 7 - 5 - 12 - 14 - 8

A solução construtiva escolhida para os envidraçados recaiu na utilização de um duplo pano de vidro incolor com baixa emissividade e espessuras de 6 e 3mm, respetivamente para o pano exterior e o interior, separados por uma caixa-de-ar preenchida com ar corrente e com uma espessura de 0,10m. Em posição intermédia entre os panos de vidro localiza-se o dispositivo de sombreamento descrito mais abaixo. Esta solução foi selecionada diretamente a partir da biblioteca de materiais disponibilizada com o *EnergyPlus* e os valores introduzidos para a caracterização das propriedades físicas dos envidraçados podem ser consultados na Tabela 10, apresentada de seguida.

Tabela 10 – Características físicas dos envidraçados utilizados no *Wee Building*

<b>Características dos Envidraçados</b>	
Espessura [m]	0,0030 ou 0,0060
Transmitância solar na incidência normal	0,63
Reflectância solar frontal na incidência normal	0,17
Reflectância solar traseira na incidência normal	0,22
Transmitância visível na incidência normal	0,84
Reflectância frontal visível na incidência normal	0,055

Tabela 10 (Continuação) - Características físicas dos envidraçados utilizados no *Wee Building*

<b>Características dos Envidraçados</b>	
Reflectância traseira visível na incidência normal	0,078
Transmitância infravermelha na incidência normal	0
Emissividade hemisférica infravermelha frontal	0,84
Emissividade hemisférica infravermelha traseira	0,10
Condutibilidade térmica [W/m.K]	0,90

Relativamente ao dispositivo de sombreamento utilizado nos envidraçados, foi selecionado um estore opaco de cor escura e com média reflectância colocado entre os panos de vidro. Esta solução é disponibilizada na biblioteca de materiais do *EnergyPlus* e encontra-se descrita detalhadamente na Tabela 11. Além disso, o funcionamento dos dispositivos de sombreamento foi agendado de forma a estar a funcionar na sua totalidade (ou seja, completamente descido) nos períodos compreendidos entre as 19:00 e as 07:00 ao longo de todo o ano, bem como quando a temperatura do ar exterior ultrapassa os 25 °C no decorrer da estação do Verão.

Tabela 11 - Características físicas dos dispositivos de sombreamento dos envidraçados utilizados no *Wee Building*

<b>Características dos Dispositivos de Sombreamento</b>	
Espessura [m]	0,005
Distância entre o dispositivo e o vidro [m]	0,05
Transmitância solar	0,40
Reflectância solar	0,50
Transmitância visível	0,40
Reflectância visível	0,50
Emissividade hemisférica infravermelha	0,90
Transmitância infravermelha	0,00
Condutibilidade térmica [W/m.K]	0,10
Multiplicador da abertura no topo	0,50
Multiplicador da abertura no fundo	0,50
Multiplicador da abertura no lado esquerdo	0,50
Multiplicador da abertura no lado direito	0,50
Permeabilidade ao fluxo de ar	0,00

### 3.2.2.3. Definição do sistema de climatização

O sistema de climatização considerado para a modelação do *Wee Building* no *EnergyPlus* consistiu na mesma solução técnica adotada no estudo paramétrico. Tal como foi referido anteriormente, esta solução foi aproveitada diretamente da sugestão do RCCTE para a definição de sistema convencional português. Assim, o sistema utilizado para suprir as necessidades de aquecimento consiste num sistema totalmente convectivo por resistência elétrica com uma eficiência de 100%, o qual funciona sempre que a temperatura no interior do edifício baixe dos 20°C. Já o sistema responsável por suprir as necessidades de arrefecimento consiste numa máquina frigorífica, dimensionado com um coeficiente de performance igual a 3.0, e que é ativado sempre que a temperatura no interior do edifício ultrapassa os 25°C. Independentemente da estação considerada, ocorre uma renovação do ar interior a uma taxa mínima de 0,6 renovações por hora para que sejam mantidas as condições mínimas de qualidade do ar no interior.

Por uma questão de simplicidade, os equipamentos descritos anteriormente encontram-se apenas instalados nas divisões (ou zonas úteis) em que é expectável que se permaneça mais tempo. Foram então instalados no escritório, na sala de estar, nos quartos e na suite.

### 3.2.2.4. Definição dos parâmetros climáticos e do tipo de solo

A primeira localização selecionada para a aplicação do caso de estudo é a cidade transmontana de Bragança, localizada na zona nordeste do interior do país. Segundo o ficheiro climático fornecido pelo *United States Department of Energy*, a cidade de Bragança encontra-se situada a 41,47° de latitude, -6,43° de longitude e a uma altitude média de 692 metros acima do nível do mar e apresenta uma pressão atmosférica com o valor médio de 93283 Pa. No que toca às temperaturas do ar exterior, o ficheiro climático indica que as mesmas variam entre os extremos de -6,0 e os 36,2°C, registados nos dias 19 de Janeiro e 19 de Agosto, respetivamente.

Como é possível observar no gráfico da Figura 31, as temperaturas médias mensais do solo em profundidade apresentam variações menos significativas, comparativamente com as camadas mais superficiais do solo e as registadas para o ar exterior. Os valores registados para os 0,50, 2,00 e 4,00 metros de profundidade, bem como para a temperatura do ar exterior foram retiradas diretamente do ficheiro climático para a cidade de Bragança.

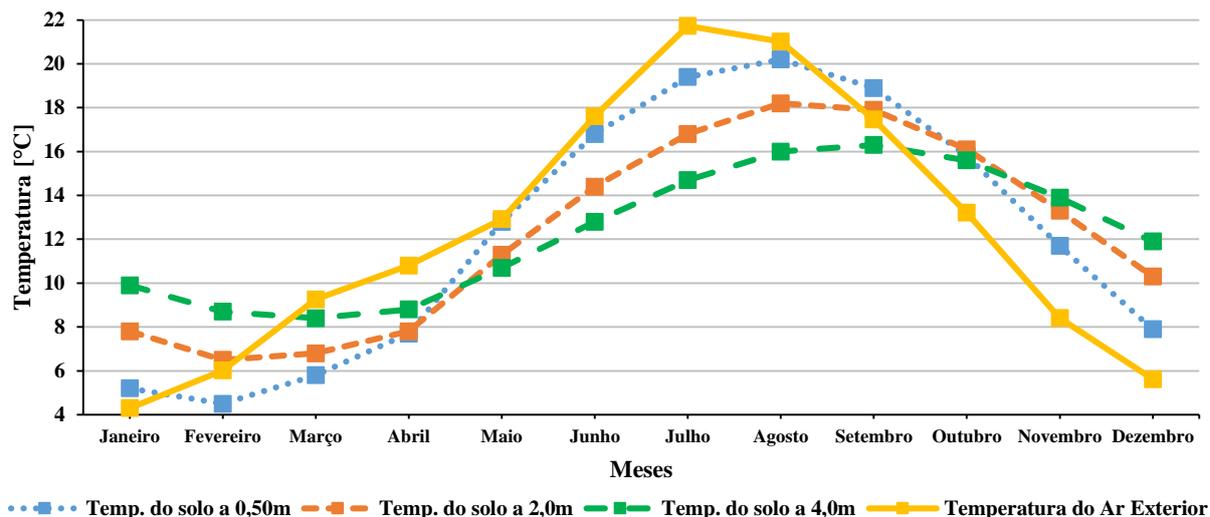


Figura 31 - Variação da temperatura média mensal do ar exterior e do solo na cidade de Bragança

Na Tabela 12 são apresentados os valores médios mensais das temperaturas do solo, a várias profundidades e considerando uma difusividade igual a  $2,3225760 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{dia}$ , e do ar exterior utilizados para a construção do gráfico da Figura 31.

Tabela 12 - Variação das temperaturas do ar exterior e do solo na cidade de Bragança

Meses	Temperatura do Solo em Profundidade [°C]			Temperatura do Ar Exterior [°C]
	0,50m	2,00m	4,00m	
<b>Janeiro</b>	5,2	7,8	9,9	4,3
<b>Fevereiro</b>	4,5	6,5	8,7	6,0
<b>Março</b>	5,8	6,8	8,4	9,3
<b>Abril</b>	7,7	7,8	8,8	10,8
<b>Mai</b>	12,8	11,3	10,7	12,9
<b>Junho</b>	16,8	14,4	12,8	17,6
<b>Julho</b>	19,4	16,8	14,7	21,7
<b>Agosto</b>	20,2	18,2	16,0	21,0
<b>Setembro</b>	18,9	17,9	16,3	17,5
<b>Outubro</b>	15,8	16,1	15,6	13,2
<b>Novembro</b>	11,7	13,3	13,9	8,4
<b>Dezembro</b>	7,9	10,3	11,9	5,6

Os parâmetros de dimensionamento do sistema de permutador de calor ar-solo relativos à temperatura média anual da superfície do solo, à amplitude de temperaturas na superfície do solo

e à constante de fase da temperatura da superfície do solo, todos eles fornecidos pela aplicação *CalcSoilSurfTemp*, foram determinados considerando que o solo à superfície encontra-se coberto e húmido e que em profundidade é pesado e húmido. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Temperatura média anual da superfície do solo: 13,959813117981 °C
- Amplitude de temperaturas na superfície do solo: 8,644130706787 °C
- Constante de fase da temperatura da superfície do solo: 31 dias

A segunda localização selecionada para a aplicação do caso de estudo é a cidade alentejana de Évora, localizada na zona centro-sul do país. De acordo com o ficheiro climático fornecido pelo *United States Department of Energy*, a cidade de Évora localiza-se a 38,34° de latitude, -7,54° de longitude e a uma altitude média de 321 metros acima do nível do mar, apresentando uma pressão atmosférica com o valor médio de 97528 Pa. Relativamente às temperaturas do ar exterior, o ficheiro climático indica que as mesmas variam entre os extremos de 1,6 e os 38,4°C, registados nos dias 31 de Janeiro e 23 de Julho, respetivamente.

No gráfico da Figura 32 é possível observar que as temperaturas médias mensais do solo, em profundidade, apresentam variações menos significativas comparativamente com as registadas para o ar exterior e as camadas mais superficiais do solo.

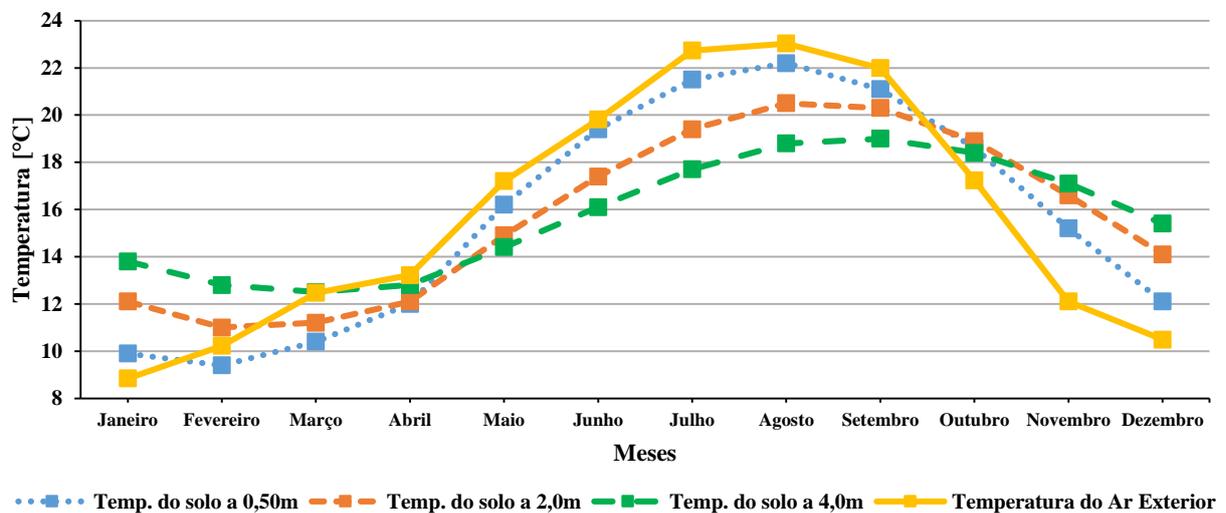


Figura 32 - Variação da temperatura do ar exterior e do solo na cidade de Évora

Os valores das temperaturas registados para os 0,50, 2,00 e 4,00 metros de profundidade, bem como para a temperatura do ar exterior têm origem no já referido ficheiro climático para a cidade de Évora. Os valores referentes às temperaturas do solo foram obtidos considerando uma difusividade igual a  $2,3225760 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{dia}$  e podem ser consultados na Tabela 13, apresentada de seguida.

Tabela 13 - Variação das temperaturas do ar exterior e do solo na cidade de Évora

Meses	Temperatura do Solo em Profundidade [°C]			Temperatura do Ar Exterior [°C]
	0,50m	2,00m	4,00m	
<b>Janeiro</b>	9,9	12,1	13,8	8,8
<b>Fevereiro</b>	9,4	11,0	12,8	10,2
<b>Março</b>	10,4	11,2	12,5	12,5
<b>Abril</b>	12,0	12,1	12,8	13,2
<b>Mai</b>	16,2	14,9	14,4	17,2
<b>Junho</b>	19,4	17,4	16,1	19,8
<b>Julho</b>	21,5	19,4	17,7	22,7
<b>Agosto</b>	22,2	20,5	18,8	23,0
<b>Setembro</b>	21,1	20,3	19,0	22,0
<b>Outubro</b>	18,6	18,9	18,4	17,2
<b>Novembro</b>	15,2	16,6	17,1	12,1
<b>Dezembro</b>	12,1	14,1	15,4	10,5

Os parâmetros de dimensionamento do sistema de permutador de calor ar-solo fornecidos pela aplicação *CalcSoilSurfTemp* relativos à temperatura média anual da superfície do solo, à amplitude de temperaturas na superfície do solo e à constante de fase da temperatura da superfície do solo, foram determinados considerando que o solo à superfície encontra-se coberto e húmido e que em profundidade é pesado e húmido. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Temperatura média anual da superfície do solo: 16,11844497070 °C
- Amplitude de temperaturas na superfície do solo: 9,879736900330 °C
- Constante de fase da temperatura da superfície do solo: 50 dias

A cidade de Lisboa, a terceira localização selecionada para a aplicação do caso de estudo localiza-se na zona do litoral centro do país. De acordo com o ficheiro climático fornecido pelo *United States Department of Energy*, a cidade de Lisboa localiza-se a 38,43° de latitude, -9,80° de longitude e a uma altitude média de 71 metros acima do nível do mar, apresentando uma pressão atmosférica com o valor médio de 100475 Pa. Quanto às temperaturas do ar exterior, o ficheiro climático indica que estas variam entre os extremos de 4,1 e os 36,0°C, registados nos dias 31 de Janeiro e 29 de Agosto, respetivamente.

No gráfico da Figura 33 é possível observar que as temperaturas médias mensais do solo, expressas a vários níveis de profundidade, apresentam variações menos significativas comparativamente com as registadas para o ar exterior.

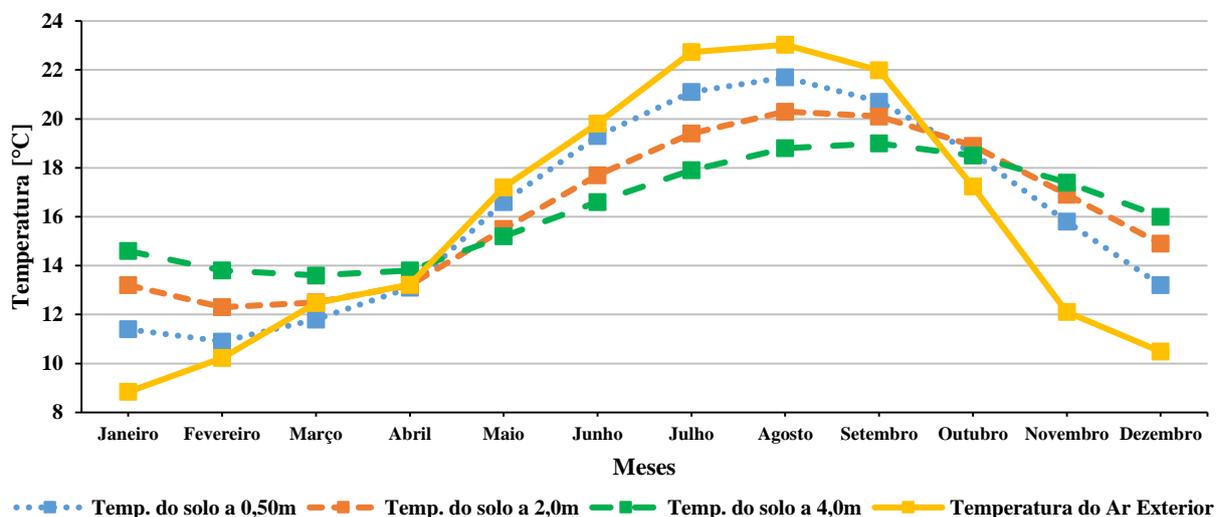


Figura 33 - Variação da temperatura do ar exterior e do solo na cidade de Lisboa

Os valores das temperaturas registados no ficheiro climático de Lisboa para os 0,50, 2,00 e 4,00 metros de profundidade, bem como para a temperatura do ar exterior, e que originaram o gráfico da figura anterior, são apresentados na Tabela 14. Os valores referentes às temperaturas do solo foram obtidos considerando uma difusividade igual a  $2,3225760 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{dia}$ .

Tabela 14 - Variação das temperaturas do ar exterior e do solo na cidade de Lisboa

Meses	Temperatura do Solo em Profundidade [°C]			Temperatura do Ar Exterior [°C]
	0,50m	2,00m	4,00m	
<b>Janeiro</b>	11,4	13,2	14,6	8,8
<b>Fevereiro</b>	10,9	12,3	13,8	10,2
<b>Março</b>	11,8	12,5	13,6	12,5
<b>Abril</b>	13,1	13,2	13,8	13,2
<b>Maió</b>	16,6	15,5	15,2	17,2
<b>Junho</b>	19,3	17,7	16,6	19,8
<b>Julho</b>	21,1	19,4	17,9	22,7
<b>Agosto</b>	21,7	20,3	18,8	23,0
<b>Setembro</b>	20,7	20,1	19,0	22,0
<b>Outubro</b>	18,6	18,9	18,5	17,2
<b>Novembro</b>	15,8	16,9	17,4	12,1
<b>Dezembro</b>	13,2	14,9	16,0	10,5

Os parâmetros de dimensionamento do sistema de permutador de calor ar-solo fornecidos pela aplicação *CalcSoilSurfTemp* relativos à temperatura média anual da superfície do solo, à amplitude de temperaturas na superfície do solo e à constante de fase da temperatura da superfície do solo, foram determinados considerando que o solo à superfície encontra-se coberto e húmido e que em profundidade é pesado e húmido. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Temperatura média anual da superfície do solo: 16,677175521851 °C
- Amplitude de temperaturas na superfície do solo: 5,194078922272 °C
- Constante de fase da temperatura da superfície do solo: 42 dias

A última localização selecionada para a aplicação do caso de estudo é a cidade do Porto, localizada na zona litoral norte do país. Tendo por base o ficheiro climático fornecido pelo *United States Department of Energy*, localização da cidade do Porto corresponde a 41,13° de latitude, - 8,40° de longitude, a uma altitude média de 73 metros acima do nível do mar e apresenta uma pressão atmosférica média de 100451 Pa. Relativamente às temperaturas do ar exterior, o ficheiro climático indica que as mesmas variam entre os extremos de 0,0° e os 32,0°C, registados nos dias 01 de Janeiro e 06 de Julho, respetivamente.

No gráfico da Figura 34 é possível observar as temperaturas médias mensais do solo em várias profundidades e do ar exterior para a cidade do Porto. Os registos presentes no ficheiro climático correspondem aos valores registados para os 0,50, 2,00 e 4,00 metros de profundidade e, como se pode observar no gráfico abaixo, apresentam variações menos significativas, comparativamente com as registadas para o ar exterior e as camadas mais superficiais do solo.

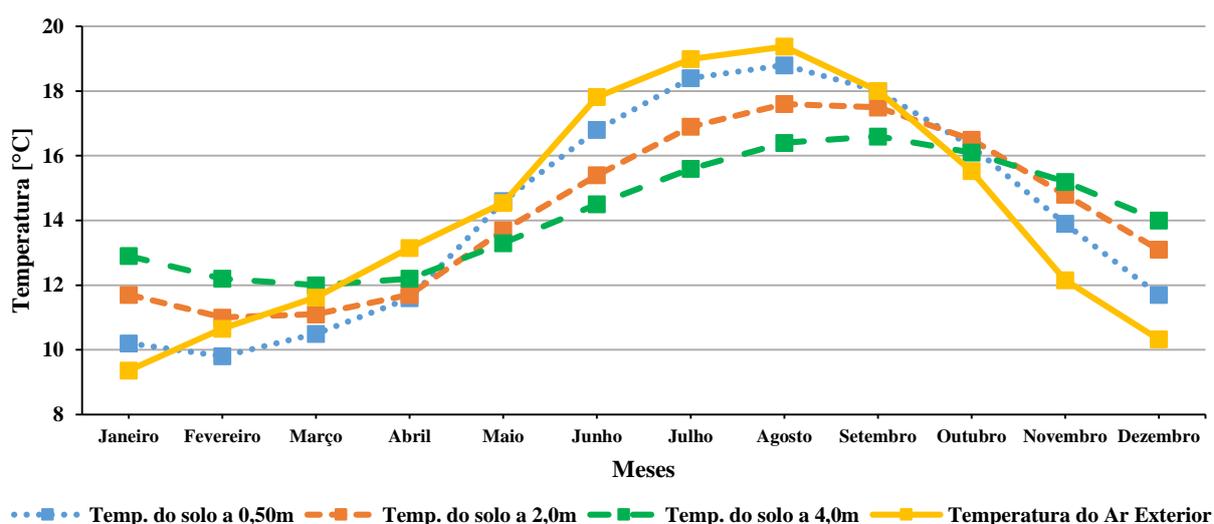


Figura 34 - Variação da temperatura do ar exterior e do solo na cidade do Porto

A Tabela 15 apresenta os valores médios mensais das temperaturas do solo, a várias profundidades e considerando uma difusividade igual a  $2,3225760 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{dia}$ , e do ar exterior utilizados para a construção do gráfico da Figura 34.

Tabela 15 - Variação das temperaturas do ar exterior e do solo na cidade do Porto

Meses	Temperatura do Solo em Profundidade [°C]			Temperatura do Ar Exterior [°C]
	0,50m	2,00m	4,00m	
<b>Janeiro</b>	10,2	11,7	12,9	9,4
<b>Fevereiro</b>	9,8	11,0	12,2	10,7
<b>Março</b>	10,5	11,1	12,0	11,6
<b>Abril</b>	11,6	11,7	12,2	13,2
<b>Maió</b>	14,6	13,7	13,3	14,5
<b>Junho</b>	16,8	15,4	14,5	17,8
<b>Julho</b>	18,4	16,9	15,6	19,0
<b>Agosto</b>	18,8	17,6	16,4	19,4
<b>Setembro</b>	18,0	17,5	16,6	18,0
<b>Outubro</b>	16,3	16,5	16,1	15,5
<b>Novembro</b>	13,9	14,8	15,2	12,2
<b>Dezembro</b>	11,7	13,1	14,0	10,3

Os parâmetros de dimensionamento do sistema de permutador de calor ar-solo fornecidos pela aplicação *CalcSoilSurfTemp* e relativos à temperatura média anual da superfície do solo, à amplitude de temperaturas na superfície do solo e à constante de fase da temperatura da superfície do solo, foram determinados considerando que o solo à superfície encontra-se coberto e húmido e que em profundidade é pesado e húmido. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Temperatura média anual da superfície do solo: 15,998669624329 °C
- Amplitude de temperaturas na superfície do solo: 4,516154289246 °C
- Constante de fase da temperatura da superfície do solo: 30 dias

### 3.2.2.5. Definição do sistema de permutador de calor ar-solo

Tem como base os conhecimentos adquiridos com a realização do estudo paramétrico e os provenientes da bibliografia publicada, foi realizado um cuidadoso dimensionamento do sistema de permutador de calor ar-solo aplicado no edifício em estudo. Assim, como ficou anteriormente

provado, os benefícios energéticos proporcionados por tubos enterrados em aço e betão são ligeiramente superiores aos do PVC. No entanto, optou-se por utilizar o tubo em PVC no dimensionamento dos tubos enterrados, por ser mais barato do que os correspondentes em aço e betão. Além disso, a análise da bibliografia publicada indicou que os tubos de PVC são amplamente utilizados em sistemas atualmente em funcionamento, mesmo tendo em conta a sua eficiência ligeiramente inferior, devido às suas elevadas resistência e durabilidade. Salienta-se ainda que o tubo utilizado pode ser considerado como genérico, visto que as suas propriedades físicas correspondem ao material normalmente utilizado no mercado e seguem a linha do que é considerado como convencional. As referidas propriedades físicas podem ser consultadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Características físicas do sistema de permutador de calor ar-solo

<b>Tubo de PVC</b>			
<b>Espessura [m]</b>	<b>Diâmetro [m]</b>	<b>Profundidade [m]</b>	<b>Condutividade Térmica [W/m-K]</b>
0,003	0,20	4,00	0,17

Tal como já foi analisado anteriormente, o comprimento do tubo enterrado desempenha um papel relativamente importante no desempenho do permutador de calor ar-solo, na medida em que ajuda a controlar melhor os consumos energéticos para aquecimento e arrefecimento. No entanto, para que o desempenho do sistema seja realmente eficaz, é necessário encontrar o equilíbrio entre o comprimento do tubo, as reduções obtidas nos consumos energéticos e os custos de investimento iniciais. Assim, deve-se procurar dimensionar o comprimento do tubo enterrado de acordo com as dimensões da zona útil que este vai servir para que seja evitada a colocação de material desnecessário e a inflação dos custos finais. Além disso, visto que o caudal de ar que circula no interior do sistema de tubos enterrados influencia significativamente a eficiência geral do permutador de calor ar-solo, então este também deve ser dimensionado com relativa atenção. No caso de este ser demasiado elevado, para além de causar um possível desconforto nos ocupantes devido a correntes de ar e a sobreaquecimento ou sobreaquecimento, também não permite que seja realizada uma troca eficiente de calor entre o ar e o solo. Pelo contrário, se o caudal for demasiado reduzido não causa o efeito térmico pretendido.

Por conseguinte, o caudal de ar adotado para a realização da presente aplicação foi dimensionado por forma a realizar uma renovação do volume de ar no interior do edifício a uma taxa mínima de 0,60 renovações horárias nas situações de temperatura exterior mais desfavoráveis e de 1,00

nas restantes. Pretende-se desta forma maximizar o efeito da renovação do ar interior conjugando-o com a temperatura do ar exterior para que, na estação de aquecimento se minimizem as perdas de calor pela renovação do ar e na estação de arrefecimento se promova a renovação do ar interior enquanto se diminui a carga térmica do edifício. Assim, consegue-se maximizar o aproveitamento das flutuações de temperatura do ar exterior para reduzir ao máximo o funcionamento do sistema de climatização.

Na Tabela 17 apresenta-se, de uma forma sumária, o comprimento do tubo enterrado associado a cada zona térmica e o respetivo caudal de ar insuflado (designado por  $E_d$ ). Como se pode observar na tabela abaixo apresentada, o sistema de permutador de calor ar-solo apresenta um funcionamento mais intenso no período noturno das estações da primavera e do verão para reduzir a carga térmica do edifício, enquanto nas estações do outono e inverno é mantido um caudal de insuflação constante para minimizar a ocorrência provável de sobrearrefecimento. As designadas horas desfavoráveis correspondem a todas as horas do dia ao longo das estações do outono e do inverno e as compreendidas no período das 09:00 às 22:00 nas estações da primavera e do verão (nas quais se renova o ar interior a uma taxa de 0,6 renovações por hora), enquanto as horas favoráveis correspondem às horas compreendidas no período das 22:00 às 09:00 das estações da primavera e do verão (em que se renova o ar interior a uma taxa de 1,0 renovações por hora).

Refere-se ainda que em resultado dos conhecimentos adquiridos com a consulta bibliográfica e com os resultados obtidos com o estudo paramétrico (apresentados no Capítulo 4), o comprimento adotado para o tubo enterrado depende diretamente do somatório da área útil de todas as divisões servidas pelo permutador de calor ar-solo. Ou seja, a área de cada zona térmica servida pelo sistema *EAHE* foi diretamente convertida num valor de comprimento de tubo. Assim, tomando como exemplo a zona térmica do escritório, a área útil de 12,56 m<sup>2</sup> foi convertida em 15 metros de comprimento de tubo enterrado.

Tabela 17 – Esquema de funcionamento do permutador de calor ar-solo

Zona Térmica	Área útil [m <sup>2</sup> ]	Volume Interior [m <sup>3</sup> ]	E <sub>d</sub> – horas desfavoráveis [m <sup>3</sup> /s]	E <sub>d</sub> – horas favoráveis [m <sup>3</sup> /s]	Comprimento do tubo enterrado [m]
Escritório	12,56	33,912	0,0056526	0,0094200	15
Sala de Estar	43,23	116,721	0,0194535	0,0324225	45
Quarto 1	16,61	44,847	0,0074745	0,0124575	20
Quarto 2	18,26	49,302	0,0082170	0,0136950	20
Suite	31,80	85,860	0,0143100	0,0238500	35
<b>Total</b>					135

Para além do caudal de ar insuflado, também o termóstato do sistema *EAHE* foi calibrado para maximizar o funcionamento de todo o sistema. Assim, o sistema foi dimensionado para funcionar num intervalo de temperaturas do ar interior entre os 20 e os 27°C e sempre que a diferença de temperaturas de bulbo seco do ar interior e exterior for maior ou igual a 2°C. Garante-se assim que o sistema de tubos enterrados só efetua ventilação sempre que haja uma diferença significativa de temperaturas entre o ar exterior e o interior, evitando a possibilidade de ocorrência de sobreaquecimento ou sobrearrefecimento do ambiente habitável.

### 3.2.2.6. Definição dos ganhos internos

Os ganhos internos considerados na modelação do edifício para a aplicação do caso de estudo consistem no conjunto de energia libertada pelas pessoas aquando da realização das mais variadas atividades, da iluminação utilizada e dos equipamentos elétricos de cada zona térmica. Convém referir que os ganhos internos de um edifício são bastante difíceis de contabilizar de uma forma exata, porque dependem dos hábitos de cada utilizador do edifício, dos equipamentos realmente instalados e/ou da utilização que se irá dar ao edifício. Por tudo isto, os valores dos ganhos internos considerados no presente caso de estudo correspondem aos apontados pela regulamentação norte-americana atualmente em vigor e os horários de funcionamento utilizados tentam uma aproximação verosímil à realidade.

Os ganhos internos resultantes da atividade humana no interior do edifício foram diretamente retirados da norma americana ASHRAE 90.1-2010, a qual define os ganhos internos por atividade e por pessoa conforme se pode observar na Tabela 18.

Tabela 18 – Ganhos internos consoante a atividade humana

<b>Atividades</b>	<b>Ganhos Internos [W/pessoa]</b>
Dormir	72
Cozinhar	185
Limpezas domésticas	290
Caminhar	180
Escrever no computador	117
Sentar	108

O *EnergyPlus* está programado para definir por defeito que, quando existem ganhos internos devidos à atividade humana, estes devem ser maiores ou iguais a 70 W/pessoa, o que corresponde a aproximadamente à energia desperdiçada pelo corpo humano quando está a dormir. Por este motivo, foram definidos os seguintes perfis das mais diversas atividades em cada zona térmica (Tabela 19), os quais funcionam ininterruptamente ao longo do ano.

Tabela 19 – Agendamento dos ganhos internos devidos à atividade humana

<b>Ganhos Internos [W/pessoa]</b>							
<b>Zonas Térmicas</b>							
<b>Horas</b>	<b>Escritório</b>	<b>Sala</b>	<b>Cozinha</b>	<b>WC's</b>	<b>Halls</b>	<b>Quartos</b>	<b>Quarto de Vestir</b>
00:00 – 07:00	70	70	70	70	70	72	70
07:00 – 09:00		108	185	185	180		180
09:00 – 12:00	290	290	290	290	290	290	290
12:00 – 13:00	70	108	185	185	180	70	70
13:00 – 14:00	117		70				
14:00 – 19:00							
19:00 – 20:00							
20:00 -21:00	70		185				
21:00 – 22:00	117	180	185				
22:00 – 23:00		180					
23:00 – 24:00	70	70	70	70	70	72	70

Relativamente aos ganhos internos devidos à iluminação interior utilizada, foram também considerados os níveis de iluminação apontados, pela norma americana ASHRAE 90.1-2010, como níveis padrão. Esta norma refere os níveis de iluminação que podem ser considerados para cada divisão dos edifícios e utiliza como unidades os  $W/ft^2$  (watt por pé quadrado). Os valores são apresentados, de seguida, na Tabela 20.

Tabela 20 – Níveis de iluminação por divisão apontados pela norma *ASHRAE* 90.1-2010

<b>Compartimento</b>	<b>Ganhos Internos [W/ft<sup>2</sup>]</b>
Corredor	0,66
Sala de Estar/Jantar	0,89
Cozinha	0,99
Hall	0,90
Escritório	1,11
Casa de banho	0,98
Escadaria	0,69
Quarto de dormir	0,38

Por uma questão de simplificação, aquando da introdução de dados para modelação do edifício, considerou-se que o esquema de funcionamento do sistema de iluminação funciona em todos os dias do ano e com o agendamento expresso na Tabela 21. Na referida tabela é descrita a percentagem da iluminação total considerada que se encontra ativada em cada período de tempo.

Tabela 21 – Agendamento dos ganhos internos devidos à iluminação interior

<b>Ganhos Internos devidos à iluminação interior</b>	
<b>Horário de Funcionamento</b>	<b>Percentagem da iluminação total ativada [%]</b>
00:00 – 06:00	10
06:00 – 08:00	35
08:00 – 09:00	30
09:00 – 17:00	10
17:00 – 23:00	60
23:00 – 24:00	10

Os ganhos internos relativos aos equipamentos elétricos, considerados na modelação do *Wee Building*, foram dimensionados de acordo com os valores padrão de potência apontados pelo Manual de Utilização do *EnergyPlus* (*EnergyPlus*, 2013) e consideraram-se apenas os equipamentos elétricos convencionalmente presentes nos lares portugueses. Os valores das potências utilizados são indicados de seguida na Tabela 22.

Tabela 22 – Valores de potência considerados para os equipamentos elétricos

<b>Equipamentos</b>	<b>Potência [W]</b>
Computador	250
Exaustor	150
Ferro de engomar	800
Forno elétrico	2500
Frigorífico	140
Máquina de lavar louça	2000
Máquina de lavar roupa	900
Máquina de secar roupa	1000
Micro-ondas	1000
Placa elétrica	1500
Secador do cabelo	300
Televisão	90
Termoacumulador	1500
Toalheiro elétrico	1900

O perfil de funcionamento considerado para a utilização dos equipamentos elétricos é apontado na Tabela 23, na qual é apresentada, para cada período de tempo, a percentagem de equipamentos em funcionamento.

Tabela 23 – Agendamento dos ganhos internos devidos à utilização de equipamentos elétricos

<b>Ganhos Internos devidos à utilização de equipamentos elétricos</b>	
<b>Horário de Funcionamento</b>	<b>Percentagem da iluminação total ativada [%]</b>
00:00 – 06:00	10
06:00 – 08:00	40
08:00 – 09:00	30
09:00 – 17:00	20
17:00 – 23:00	60
23:00 – 24:00	10

### **3.3. Metodologia da análise económica**

#### **3.3.1. Enquadramento**

Analisados os resultados dos consumos energéticos das soluções base e das soluções com o permutador de calor ar-solo do caso de estudo, pretende-se também analisar os custos orçamentais associados à instalação de um sistema *EAHE* e os respetivos períodos de amortização para cada uma das localizações consideradas. Esta análise revela-se fulcral para avaliar a aplicabilidade do sistema estudado no território português ao determinar os possíveis benefícios económicos a médio e longo prazo resultantes, um dos principais objetivos deste estudo. A análise que se irá realizar será fundada através da pesquisa à bibliografia disponibilizada, na qual se apresentam estudos associados aos custos orçamentais e de amortização de sistemas de tubos enterrados no solo, semelhantes ao que se pretende realizar.

Os valores indicados neste trabalho, obtidos diretamente a partir do gerador de preços da *CYPE*, irão refletir os custos diretos relacionados com o preço de aquisição ou de utilização de equipamentos e os custos com a mão-de-obra necessária à execução das tarefas. Além disso, serão também considerados os custos resultantes da necessidade de meios auxiliares, bem como os custos indiretos associados à realização de cada atividade, os quais pretendem representar aproximadamente as despesas administrativas, comerciais, financeiras e tributárias, gastos inerentes à segurança no trabalho, entre outros.

Na presente análise de custos serão também contabilizados os gastos inerentes à escavação das valas para introdução dos tubos enterrados. Para tal, será considerada uma constituição em saibro compacto em toda a extensão da vala para instalação dos tubos enterrados. Esta opção de simplificação das características do terreno foi tomada devido ao carácter genérico do corrente estudo, visto não ser aplicado num local preciso e delimitado, mas sim em localizações mais gerais, nomeadamente a cidades. É, portanto, impossível poder caracterizar de forma correta o tipo de solo para cada localização, fato que se contorna ao tentar aproximar a constituição simulada da real através do aumento da resistência e consistência do solo com a profundidade. Assim, foi considerado um preço unitário no valor de 5,14€/m<sup>3</sup> para o solo em saibro compacto, a aplicar em todas as localizações estudadas e sem considerar os custos com a mão-de-obra, os meios auxiliares e os custos indiretos (CYPE, 2014).

Por último, convém também referir que todos os preços apresentados são obtidos diretamente a partir dos apontados na bibliografia disponibilizada. Assim, em casos reais os valores poderão sofrer algumas variações relativas às técnicas de escavação, equipamentos utilizados e medidas de segurança adotadas, bem como ao tipo de solo encontrado no local e às remunerações dos operários.

### **3.3.2. Análise de custos de ciclo de vida**

Começando pela determinação da quantidade de tubo enterrado necessária, serão contabilizados todos os comprimentos do tubo enterrado no solo desde a extremidade por onde entra o ar exterior até ao coletor que procederá à distribuição do fluxo de ar no interior do edifício. Os custos das tubagens que realizam a ligação entre o referido coletor e as zonas térmicas do edifício podem ser indexados aos custos associados ao sistema de climatização, o que não será realizado neste trabalho.

Na Figura 35, apresentada de seguida, pode-se observar o esquema da instalação do sistema de permutador de calor ar-solo considerado nesta análise de custos, adaptado do Manual Técnico Casa Eficiente (Casa Eficiente, 2014). O esquema de funcionamento consiste numa tomada de ar vertical em aço galvanizado (modelo PAG) da marca “Siber” com as dimensões 0,3x0,3x0,8 metros, colocada no exterior da habitação, por onde entra o ar para os tubos enterrados. Esta está ligada diretamente ao tubo enterrado verticalmente em polietileno de alta densidade (PVC) que desce até à profundidade de 4,00 metros, o qual se liga ao tubo horizontal através de um cotovelo a 90°. O tubo horizontal apresenta uma inclinação de 1% para escoar a humidade condensada nas

paredes do tubo enterrado e faz a ligação entre o tubo vertical e o coletor vertical. O sistema possui ainda um regulador de caudal de ar, filtro de ar e grelha de proteção.

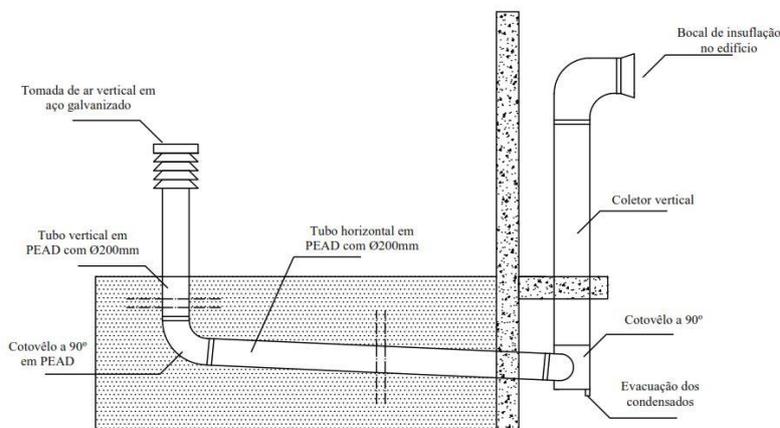


Figura 35 – Esquema de funcionamento exemplificativo do sistema *EAHE* considerado na análise de custos

Relativamente ao sistema *EAHE*, e começando pelo tubo enterrado, o material considerado para a aplicação do estudo foi o PVC. Atualmente já estão disponíveis no mercado tubagens corrugadas com tratamento bactericida e antifúngico, especialmente adaptados às funções de permutador de calor ar-solo. De acordo com a análise efetuada à bibliografia disponível, o valor unitário para cada de tubo em PVC, de 35 metros de comprimento e 0,20 metros de diâmetro, é de 46,46€ (*CYPE*, 2014). A admissão de ar exterior considerada em aço galvanizado, modelo PAG da marca “Siber”, com dimensões 0,3x0,3x0,8 metros, ligação para conduta de 0,20 metros de diâmetro, filtro de ar e grelha de proteção orça em 552,00€ (*CYPE*, 2014). Quanto ao ventilador, será contabilizado o custo de aquisição de um ventilador helicocentrífugo de baixo perfil e alto rendimento, de duas velocidades, com uma potência máxima de 48W, alimentação monofásica a 230 V e 50 Hz de frequência e um caudal máximo admissível de 580 m<sup>3</sup>/hora. Tendo como base a bibliografia disponível, o preço unitário de um ventilador com estas características é de 264,33€ (*CYPE*, 2014). O regulador de caudal de ar considerado consiste no modelo MAR 200/350 da “Siber”, o qual tem capacidade para fornecer um caudal constante de 350 m<sup>3</sup>/h e um intervalo de pressão estática entre os 50 e os 200 Pa, e apresenta um preço unitário de 55,96€. Por último, o custo referente à mão-de-obra, aos meios auxiliares e aos custos indiretos necessários à instalação do sistema *EAHE* assume um valor de 425,12€ (*CYPE*, 2014).

Quanto aos custos de manutenção do sistema de permutador de calor ar-solo, a consulta da bibliografia disponível permitiu concluir que estão quantificados em 496,61€ para um período de 10 anos (*CYPE*, 2014).

### 3.3.3. Síntese de análise económica

A síntese de análise económica que se segue pretende estudar de que forma evolui o período de retorno do investimento relativo à aquisição do equipamento acima descrito, que constitui o sistema de permutador de calor ar-solo, para cada uma das localizações estudadas.

A avaliação económica de projetos considera alguns fatores pertinentes expressos quantitativamente em termos económicos com vista a uma tomada de decisão, envolvendo gastos económicos e/ou outros recursos. O principal objetivo de uma avaliação deste tipo é auxiliar o investidor no processo de tomada de decisão para que se atinja um maior sucesso no desenvolvimento do projeto em análise. Este tipo de avaliação pode ser conjugado com outros aspetos não quantificáveis e realizado em diferentes níveis de desenvolvimento do projeto.

Uma das noções básicas de análise económica prende-se com os fluxos monetários de um projeto. É do conhecimento geral que todos os projetos têm um período de vida útil, durante o qual se gastam recursos para receber benefícios. Se estes recursos forem expressos quantitativamente numa unidade monetária, neste caso em euros, as entradas e saídas de recursos designam-se por fluxos monetários. Os fluxos monetários são geralmente positivos quando se pretende expressar a entrada de recursos e negativos quando são gastos.

Para ter uma maior noção de como se distribuem temporalmente os fluxos monetários ao longo do período de vida previsto para o projeto, é normalmente construído um diagrama de fluxos monetários acumulados - Figura 36. Neste tipo de diagramas os fluxos monetários cumulativos são apresentados no eixo das ordenadas e o período de vida útil do projeto no eixo das abcissas. Estes diagramas apresentam alguns pontos característicos, como se pode observar na referida figura. O ponto “A” corresponde ao início do projeto, logo após o surgimento da ideia e enquanto ainda se está a definir o que se pretende, motivo pelo qual ainda não houve nenhuma movimentação de fluxos monetários. A fase inicial do projeto implica a necessidade de realização de estudos de investigação e/ou desenvolvimento, de dimensionamento de vários parâmetros e outros trabalhos preliminares cuja despesa é representada pelo ponto “B”. O maior investimento de capital ocorre com a execução do processo construtivo do projeto, inflacionando rapidamente o gasto de recursos para o ponto “C”. O arranque do processo produtivo exige sempre um gasto de recursos na fase de verificação e arranque de produção, originando o ponto “D”. A partir do início de produção, o fluxo monetário de entrada de recursos é superior ao de saída e a curva dos fluxos monetários acumulados passa a apresentar um coeficiente angular positivo. Quando o conjunto total de entrada de recursos iguala as saídas anteriores, é atingido o ponto “break-even”

- ponto “F”. Eventualmente chegará uma altura em que os fluxos de entrada poderão abrandar (ponto “G”) devido a fatores como a quebra de produção devida à desatualização do processo produtivo, a necessidade de operações de manutenção dos equipamentos, o aumento de custos de produção, etc.. Por último, o ponto “H” representa o momento final da vida útil do projeto (Romero, 2013).

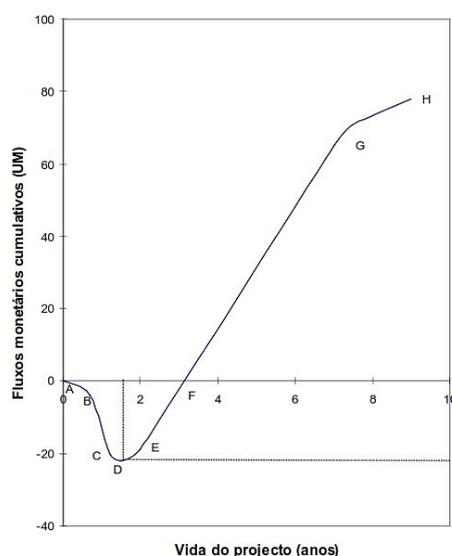


Figura 36 - Diagrama de fluxos monetários cumulativos típico de um projeto (Romero, 2013)

Os *cash-flows* (ou fluxos de caixa) referem-se aos montantes de dinheiro recebidos e gastos num projeto ao longo de um determinado período de tempo. Por norma, o método de cálculo dos *cash-flows* consiste na escolha do período de tempo que se pretende analisar, na soma das despesas e das receitas totais do projeto nesse período e na soma dos valores líquidos acumulados das despesas e das receitas. Desta forma associa-se um *cash-flow* a cada período de tempo que permite analisar os recursos financeiros gerados ou consumidos.

No caso do estudo que se efetuou neste trabalho, a definição dos *cash-flows* foi relativamente simples, visto que existe apenas o investimento inicial para a aquisição do equipamento (fluxo negativo), o investimento decenal em manutenção do sistema *EAHE* (fluxo negativo) e a poupança de energia para aquecimento ou arrefecimento proporcionada pela introdução do referido sistema (fluxo positivo). Muito embora a introdução do permutador de calor ar-solo não elimine por completo o consumo de energia elétrica com o seu funcionamento, o fato de permitir uma poupança de energia que pode ser convertida quantitativamente numa unidade monetária representa um fluxo monetário positivo.

Outra noção básica da análise económica é a da influência da inflação. Tendo como principal consequência a subida dos preços dos bens e serviços, a inflação assume valores relativamente

constantes na continuidade das medições periódicas, sendo o ano um dos períodos de referência mais utilizados. Ao usarem-se valores futuros nas análises económicas de projetos, o efeito inflacionário tem também de ser previsto para as taxas de inflação que se admitem ocorrer no futuro. Estas previsões são relativamente importantes quando se pretende realizar uma análise económica a preços correntes (como a que se pretende realizar neste trabalho), visto que os *cash-flows* são determinados considerando o efeito inflacionário para um determinado ano sobre os valores referentes ao ano zero. Os ajustamentos dos *cash-flows* em relação ao ano zero podem ser matematicamente expressos através da seguinte expressão, onde  $f_i$  é o fator de correção para o ano  $i$  e  $d_k$  o valor da inflação prevista para o ano  $n$ :

$$f_i = \sum_{k=1}^n (1 + d_k)$$

Como o preço da eletricidade é a principal origem dos recursos que vão ser analisados neste trabalho e o seu valor tem uma tendência crescente anualmente, optou-se por considerar o efeito inflacionário no preço final de venda ao público. Assim, as previsões futuras efetuadas apresentam valores que serão certamente mais aproximados aos que irão ser praticados, em detrimento de se escolher um valor fixo presente. Para tal, será considerado um valor de 1,5% para a taxa de inflação anual que, segundo algumas estimativas, prevê-se que seja o valor médio real a médio-longo prazo (ERSE, 2014).

Além disso, o preço final da eletricidade praticado atualmente varia consoante o operador escolhido, visto que o mercado da energia se encontra liberalizado, e o tarifário adotado (tarifas simples, bi-horárias ou tri-horárias). Para simplificar o processo de escolha do preço da eletricidade, foi consultado o documento regulador das tarifas transitórias de venda a clientes finais em Portugal continental em 2014, publicado pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE, 2014). Este documento define que o valor máximo aplicável a clientes finais em Baixa Tensão Normal (BTN) com potência contratada menor ou igual a 6,9 kVA e em regime de tarifa simples é de 0,1528 €/kWh. Foi escolhida uma potência com o teto máximo de 6,9 kVA porque é a que satisfaz as necessidades dos edifícios habitacionais, e foi adotada uma tarifa simples por ser a que estabelece um valor fixo ao longo de todo o dia.

O diagrama da curva cumulativa dos fluxos monetários ao longo do tempo fornece toda a informação económica acerca de um projeto e é perfeitamente adequado para comparar quantitativamente esse projeto e possíveis alternativas. Quando a medida quantitativa escolhida é o tempo, o projeto é tanto mais atrativo quanto menor for o tempo despendido para recuperar

o investimento inicial. O chamado Tempo de Retorno do Investimento (*payback period* na designação anglo-saxónica) corresponde precisamente ao tempo decorrido desde o início do projeto até ao momento em que a curva dos fluxos monetários acumulados intersesta novamente o eixo das abcissas. O tempo de retorno mede o tempo necessário para que as despesas acumuladas sejam equilibradas pelas receitas acumuladas e pode ser algebricamente calculado recorrendo à expressão apresentada de seguida:

$$\sum_{m=0}^n \frac{C_m}{(1+i)^m} = 0$$

O tempo de retorno do investimento obtém-se determinando o valor do ano  $m$  que satisfaz a expressão apresentada acima, na qual  $C_m$  representa o *cash-flow* líquido no ano  $m$  e  $i$  a taxa de atualização pretendida que, neste caso, corresponde ao valor da inflação.

Em suma, o objetivo da análise económica que se pretende realizar neste trabalho é analisar de que forma varia o tempo de retorno do investimento num sistema *EAHE* para as cidades de Bragança, Évora, Lisboa e Porto. Assim, através da análise dos *cash-flows* referidos anteriormente, da consideração do ajustamento inflacionário do preço da eletricidade e da construção do diagrama de fluxos cumulativos para cada localização será possível detetar quais são as localizações para as quais a aplicação do sistema *EAHE* faz mais sentido. Refere-se ainda que a análise económica realizada utiliza o método dos preços correntes, que a inflação prevista anualmente para a eletricidade considerada assume o valor de 1,5% ao ano, o equipamento é adquirido a pronto pagamento e a amortização do mesmo é efetuada considerando as poupanças de energia elétrica obtidas para cada localização.

## 4. Resultados

### 4.1. Resultados do Estudo Paramétrico

Tal como já foi descrito anteriormente, o estudo paramétrico realizado tem como objetivo avaliar a influência de determinados parâmetros físicos do permutador de calor ar-solo no desempenho energético do sistema de climatização, após a integração neste, além de estudar a aplicabilidade de tal sistema em climas mais moderados. Assim, torna-se importante definir como foi realizada a seleção e a disposição dos resultados obtidos, bem como as considerações tomadas para chegar até eles.

A base de comparação dos resultados obtidos, a designada *solução base*, foi desenvolvida segundo os parâmetros anteriormente descritos e produziu os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 37 e 38. Nos referidos gráficos são apresentados os valores diários dos consumos energéticos despendidos pelo sistema de ventilação para aquecimento (Energia para Aquecimento) e arrefecimento (Energia para Arrefecimento), ambos em kWh/m<sup>2</sup>, para os dias 2 de Janeiro e 10 de Agosto, respetivamente os dias mais frio e mais quente do ano. Por último, refere-se ainda que os resultados apresentados foram obtidos considerando a inexistência do sistema *EAHE*.

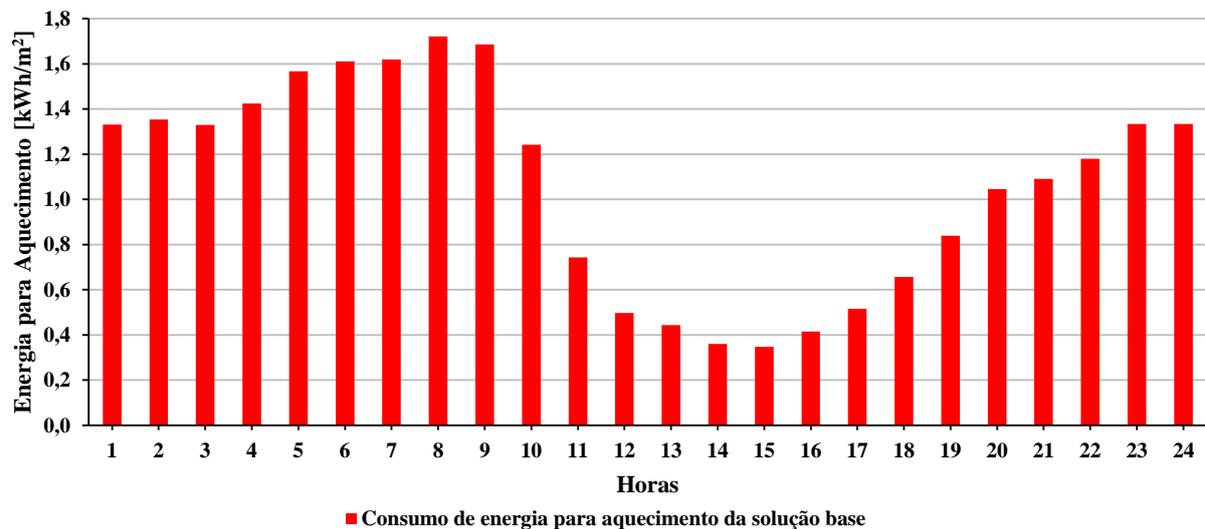


Figura 37 - Variação do consumo de energia para aquecimento da solução base no dia 2 de Janeiro

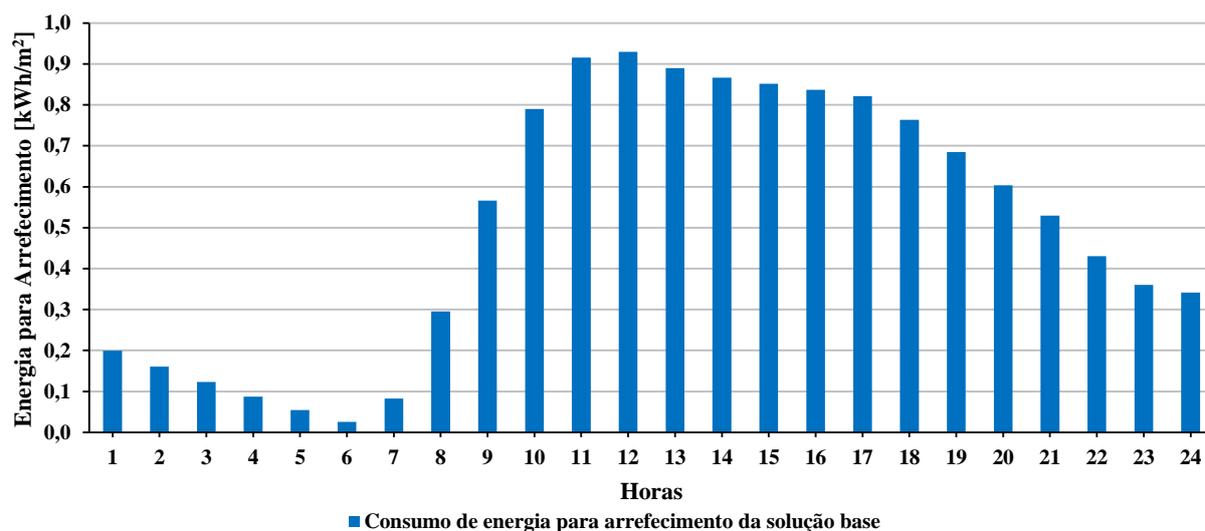


Figura 38 – Variação do consumo de energia para arrefecimento da solução base no dia 10 de Agosto

No gráfico da Figura 39 são apresentados os valores dos consumos mensais de energia elétrica para aquecimento e arrefecimento ao longo de todo o ano, para a solução base.

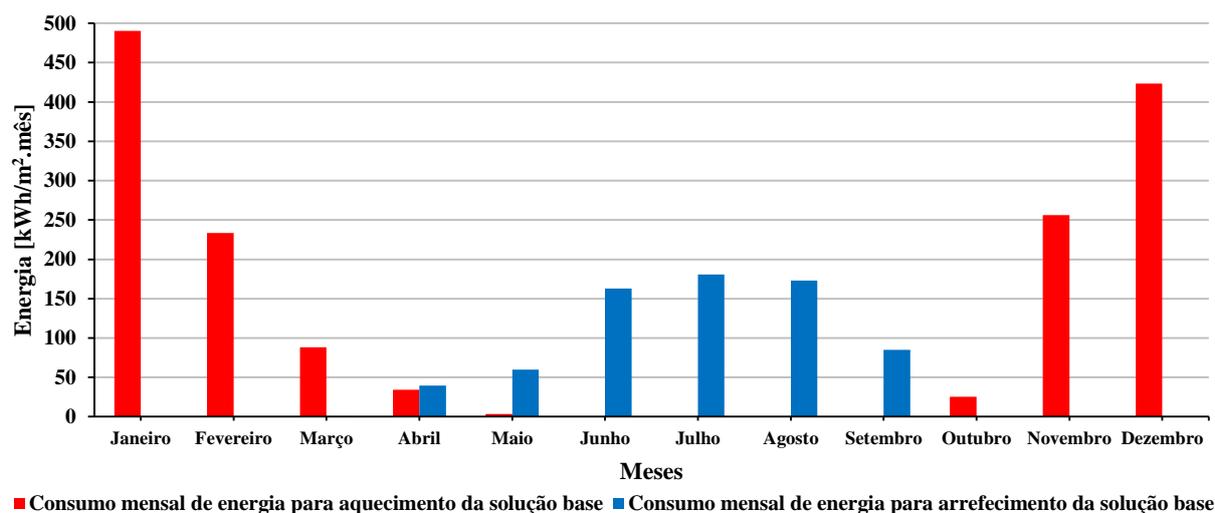


Figura 39 - Variação mensal do consumo de energia elétrica para aquecimento e arrefecimento da solução base

Será a partir dos resultados apresentados na Figura 39, para a solução base, que irão ser realizadas as comparações com os resultados das variações dos diferentes parâmetros em estudo. Por uma questão de simplificação de apresentação dos resultados, irão ser apresentados de forma completa os resultados para a primeira variação de um determinado parâmetro, sendo que os gráficos das restantes variações do mesmo parâmetro serão reportados para os anexos e as diferenças para a situação base analisadas detalhadamente. Assim, evitar-se-á a repetição de dados para resultados semelhantes.

Os gráficos representativos das diferenças de consumo energético entre a solução base e a solução híbrida, consoante cada um dos parâmetros analisados, apresentam a equação da linha que reflete a função matemática resultante da redução dos referidos consumos. Assim, ao estabelecer a redução pretendida para os consumos energéticos, obtém-se diretamente a dimensão física aproximada a considerar para o parâmetro em questão.

#### **4.1.1. Variação do comprimento**

Os resultados, apresentados de seguida para o estudo da influência da variação do comprimento do tubo enterrado no desempenho do sistema, foram obtidos assumindo valores fixos para a profundidade e o diâmetro. Assim, para cada gama de comprimentos e de materiais analisados, foram considerados um diâmetro de 0,30 metros e uma profundidade de 4,00 metros.

##### **4.1.1.1. Tubo de Betão**

Como se pode observar no gráfico da Figura 40, o consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro diminui com a introdução dos tubos enterrados no solo ao longo de todo o dia mais frio do ano, sendo esta redução de consumo mais evidente no decorrer da hora mais fria (verificada às 08:00). No decorrer desta hora o consumo de energia desce dos 1,72 kWh/m<sup>2</sup> para os 1,05 kWh/m<sup>2</sup> quando é introduzido um tubo com 25 metros de comprimento, por exemplo. Por sua vez, no decorrer da hora que apresenta a temperatura diária exterior mais elevada (que ocorre às 15:00) verifica-se também uma redução do consumo de energia dos 0,35 kWh/m<sup>2</sup> para os 0,15 kWh/m<sup>2</sup>. Pode-se então concluir que, com a introdução de apenas 25 metros de um tubo de betão, os consumos energéticos de aquecimento descem aproximadamente 39% e 57% para as horas mais fria e mais quente, respetivamente.

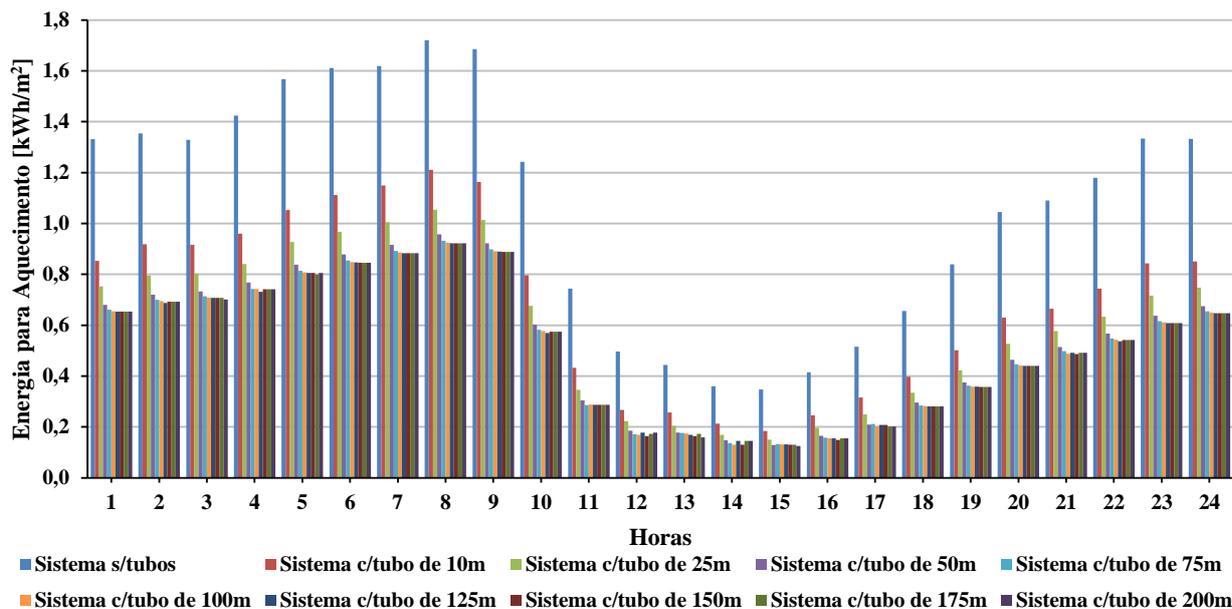


Figura 40 – Variação de consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro consoante o comprimento do tubo enterrado

Além disso, é também possível observar que a introdução de um tubo com um comprimento superior a 75 metros deixa de produzir efeitos significativos no comportamento térmico do edifício, visto que os consumos se mantêm sem grandes alterações (Figura 41). Até este valor de comprimento, verifica-se que a introdução de um tubo enterrado no solo proporciona uma redução do consumo energético diário de aquecimento que varia entre os 9,00 e os 12,82 kWh/m<sup>2</sup> para valores de comprimento de 10 e 50 metros, correspondendo a reduções dos consumos na ordem dos 38% e 54%, respetivamente.

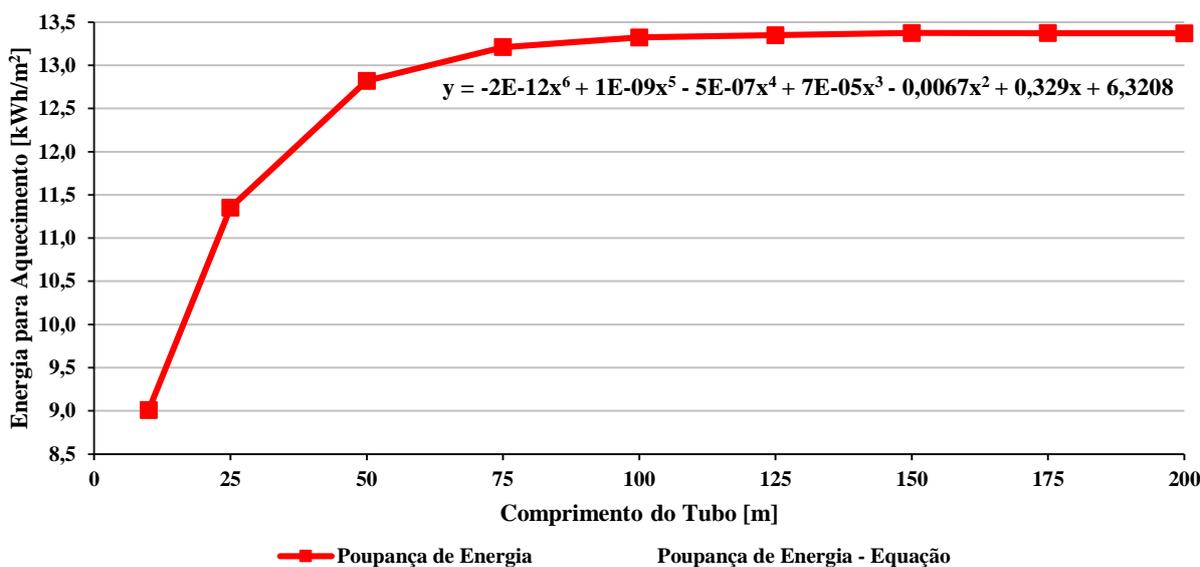


Figura 41 – Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação de comprimento do tubo

Relativamente à quantificação dos consumos energéticos de arrefecimento do dia 10 de Agosto, expressa no gráfico da Figura 42, verifica-se que estes também são reduzidos com a introdução do tubo enterrado no solo. Ao introduzir apenas 25 metros de tubo, verifica-se que o consumo de energia para arrefecimento no decorrer da hora mais quente do dia (12:00) diminui dos 0,93 kWh/m<sup>2</sup> para os 0,83 kWh/m<sup>2</sup> e é anulado no decorrer da hora mais fria do dia (06:00), quando sem o sistema de permutador de calor ar-solo havia um consumo de 0,03 kWh/m<sup>2</sup>. Estas reduções correspondem a uma redução no consumo de energia de aproximadamente 10% e 1%.

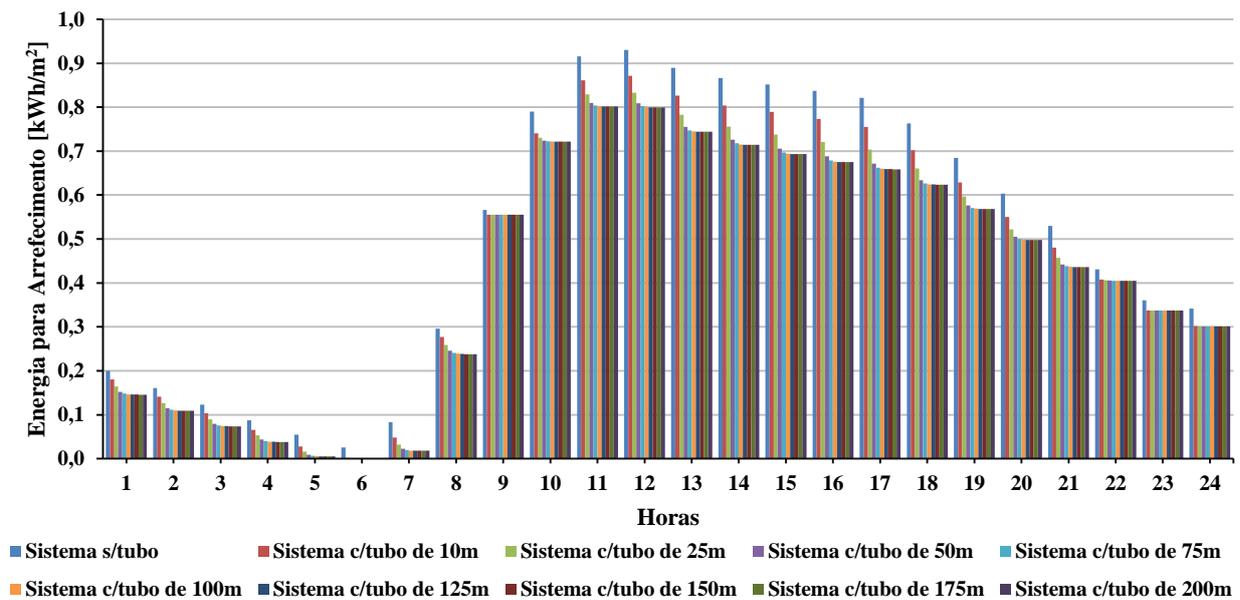


Figura 42 – Variação do consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto consoante o comprimento do tubo enterrado

Além das horas mais quente e mais fria, verifica-se que os consumos energéticos para arrefecimento sofrem uma redução ao longo de todo o dia mais quente mas o aumento do comprimento do tubo enterrado não proporciona variações muito acentuadas nos resultados, ao contrário do verificado no decorrer do dia mais frio. Esta redução da influência pode dever-se, não só à maior eficiência do sistema de arrefecimento considerado (máquina frigorífica com um COP de 3.0) quando comparado com o sistema de aquecimento (resistência elétrica com eficiência de 1.0), como também à maior aproximação das temperaturas do ar exterior no dia mais quente com a temperatura de conforto considerada para o interior do edifício (25°C), comparativamente ao dia mais frio. Como se pode observar no gráfico da Figura 43, no qual se apresenta a diferença entre os consumos energéticos para arrefecimento sem e com o tubo enterrado, o aumento do comprimento do tubo para valores superiores a 50 metros introduz reduções dos consumos energéticos de aproximadamente 0,10 kWh/m<sup>2</sup>. Neste caso, é mais significativa a redução imposta pela introdução de um tubo de 25 metros comparativamente a

um de 10 metros, onde os consumos energéticos sofrem uma redução de aproximadamente 0,56 kWh/m<sup>2</sup>.

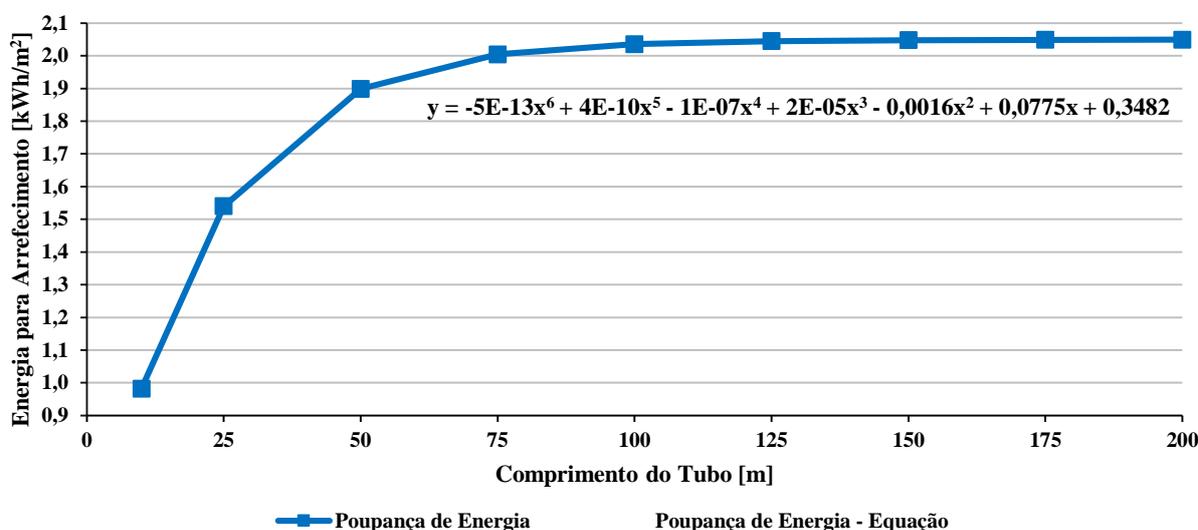


Figura 43 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação de comprimento

A variação mensal do consumo de energia para aquecimento, representada no gráfico da Figura 44, demonstra a influência positiva da introdução do sistema de permutador de calor ar-solo no comportamento térmico da célula de teste. No caso de Janeiro, o mês mais frio, o consumo mensal de energia para aquecimento desce dos 490,38 kWh/m<sup>2</sup>.mês para os 290,12 kWh/m<sup>2</sup>.mês, nas situações referentes ao sistema de climatização da situação base e o com o tubo enterrado, respetivamente, correspondendo a uma redução do consumo de aproximadamente 41%.

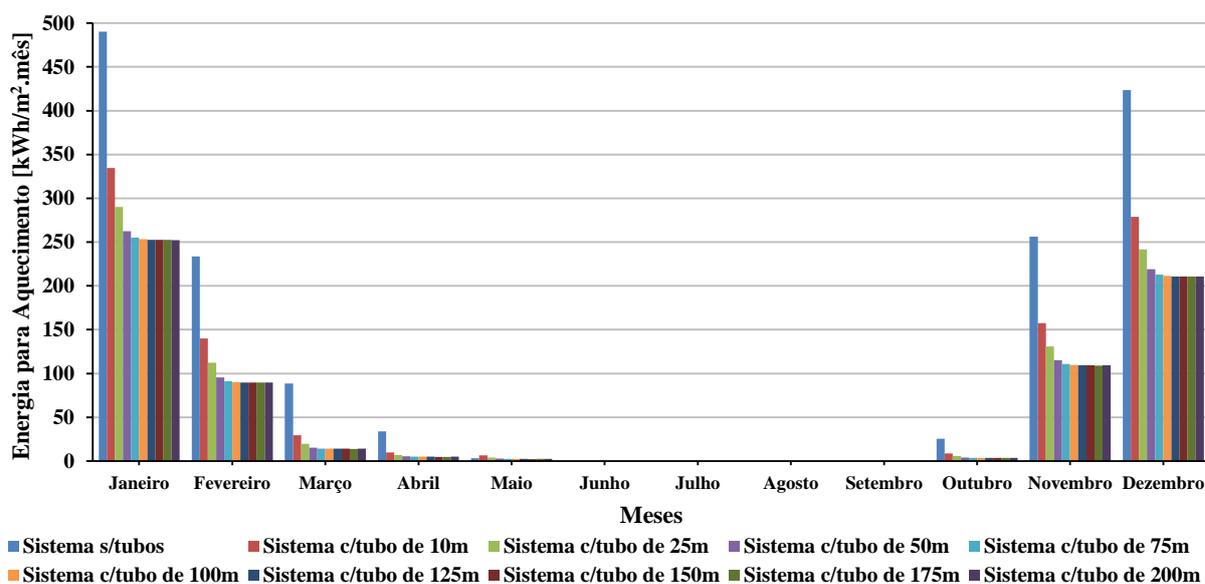


Figura 44 – Variação mensal dos consumos de energia para aquecimento consoante o comprimento do tubo enterrado

Como se pode observar no gráfico da Figura 45, a redução do consumo energético anual para aquecimento aumenta substancialmente com a introdução de um tubo enterrado com comprimentos compreendidos entre os 10 e os 50 metros. A título de exemplo, com a introdução de um tubo enterrado com 25 metros de comprimento, verifica-se uma redução total dos consumos de 743,88 kWh/m<sup>2</sup>.ano, comparativamente com o sistema de climatização da situação base, que corresponde a uma redução percentual de 48%.

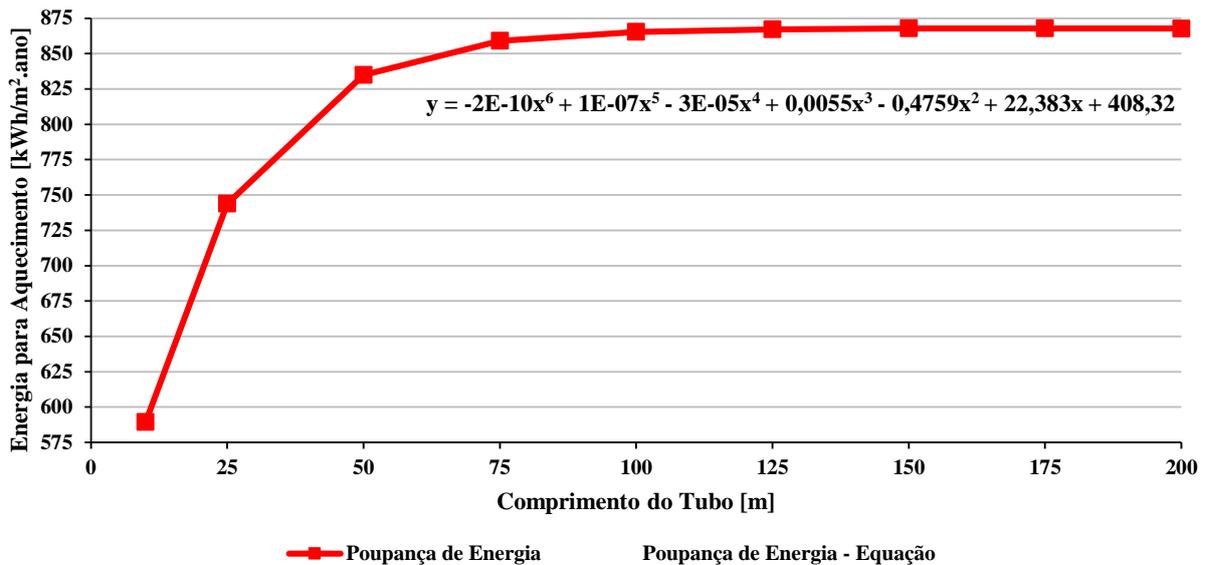


Figura 45 – Diferença de consumos energéticos anuais de aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado, consoante a variação de comprimento do tubo

A variação mensal dos consumos energéticos para arrefecimento, apresentada no gráfico da Figura 46, sofre uma redução com a introdução do permutador de calor ar-solo. No decorrer do mês de Julho, o mês mais quente de todo o ano, verifica-se a redução dos consumos energéticos de climatização dos 180,58 kWh/m<sup>2</sup>.mês do sistema sem o tubo enterrado, para os 155,44 kWh/m<sup>2</sup>.mês do sistema de climatização com um tubo enterrado de 25 metros de comprimento. Esta redução é de aproximadamente 14% e comprova a eficácia do sistema de tubos enterrados mesmo quando se verificam elevadas temperaturas do ar exterior. Além do mês mais quente, verifica-se também a redução dos consumos energéticos nas restantes ocasiões em que é necessário arrefecer o interior da célula de teste.

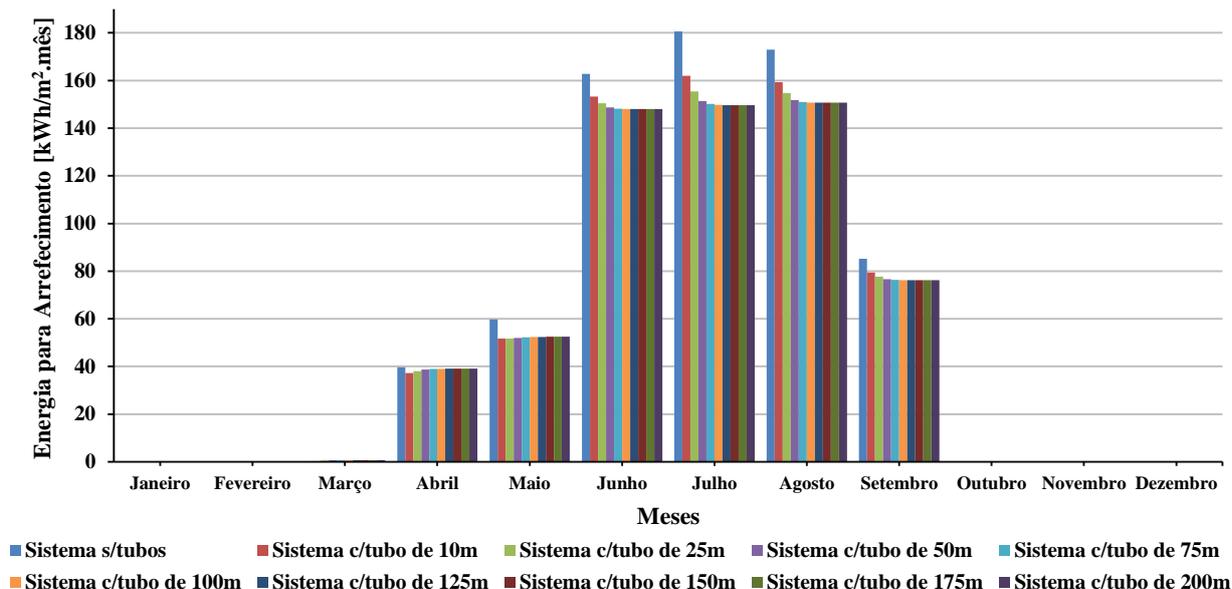


Figura 46 – Variação mensal dos consumos de energia para arrefecimento consoante o comprimento do tubo enterrado

No gráfico da Figura 47 pode-se observar o impacto positivo que a presença do sistema *EAHE* tem no comportamento térmico do edifício. A diferença de consumos energéticos entre o sistema de climatização da situação base e o sistema *EAHE* é menos significativa a partir dos 75 metros, comprimento até ao qual se verifica uma importante redução: se for considerado um tubo com 25 metros de comprimento, por exemplo, então a redução de consumos comparativamente ao sistema sem este é de 72,53 kWh/m².ano ao longo de todo o ano. Este valor corresponde a uma redução de aproximadamente 10%.

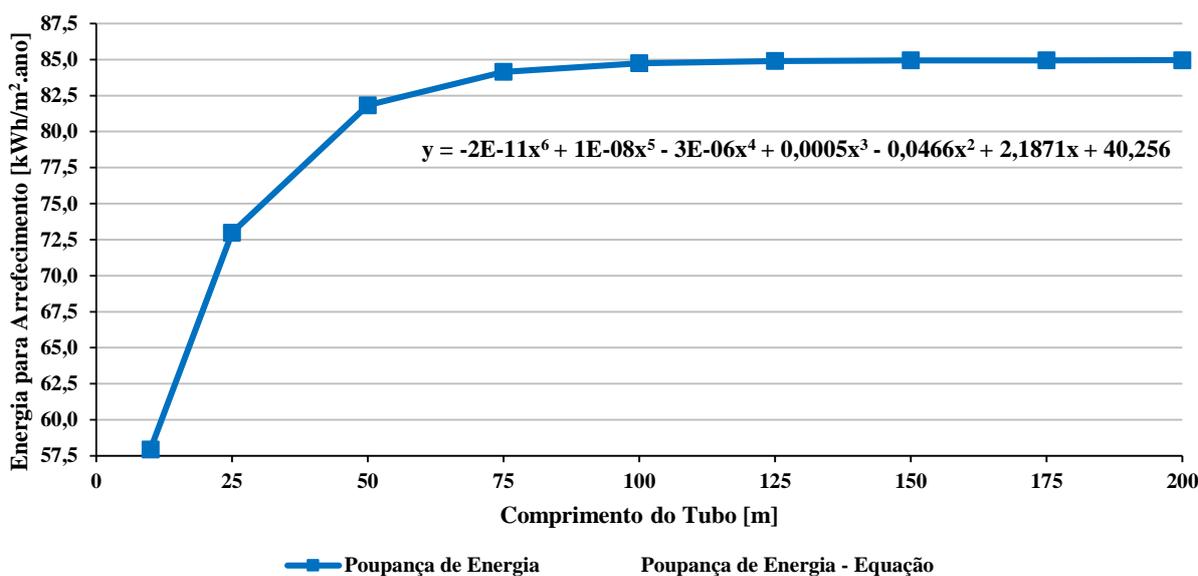


Figura 47 – Diferença de consumos energéticos anuais de arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado, consoante a variação de comprimento do tubo

#### 4.1.1.2. Tubo de Aço Inox

Como se pode observar no gráfico da Figura 48, o consumo de energia elétrica para aquecimento no dia 2 de Janeiro diminui com a introdução do permutador de calor ar-solo no sistema de climatização. Esta redução de consumo é mais evidente com a introdução de um tubo de aço com comprimentos compreendidos entre os 10 e os 50 metros e menos acentuada para a introdução de comprimentos superiores 75 e inferiores a 200 metros. Verifica-se então que a introdução de um permutador de calor ar-solo proporciona uma redução do consumo energético para aquecimento que varia entre os 9,02, os 12,86, os 13,23 e os 13,39 kWh/m<sup>2</sup> para valores de comprimento de 10, 50, 75 e 200 metros, que correspondem a reduções de 35%, 50%, 52% e 52%, respetivamente.

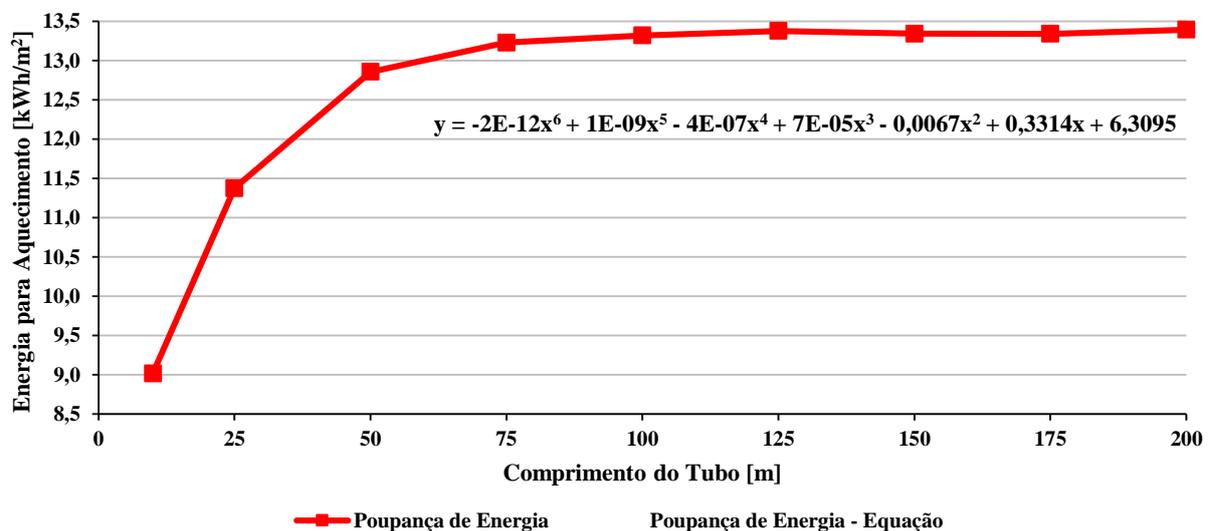


Figura 48 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação de comprimento do tubo

No gráfico da Figura 49 é representada graficamente a diferença entre os consumos energéticos para arrefecimento da situação base e após a introdução do permutador de calor ar-solo para o dia 10 de Agosto. Como se pode observar no referido gráfico, o aumento do comprimento do tubo aço para valores superiores a 75 metros introduz reduções dos consumos energéticos menos significativas quando comparadas com as resultantes de comprimentos inferiores. Neste aspeto, é mais significativa a redução imposta pela introdução de um tubo com comprimentos compreendidos entre os 10 e os 50 metros, valores para os quais os consumos energéticos para arrefecimento sofrem uma redução de aproximadamente 0,99 e 1,91 kWh/m<sup>2</sup>, que correspondem a reduções percentuais entre os 8% e os 16%. A introdução de um tubo com 75 ou 200 metros

de comprimento proporciona uma redução dos consumos energéticos de 2,01 e 2,05 kWh/m<sup>2</sup>, que corresponde a reduções de 16% e 17%, comparativamente à situação base.

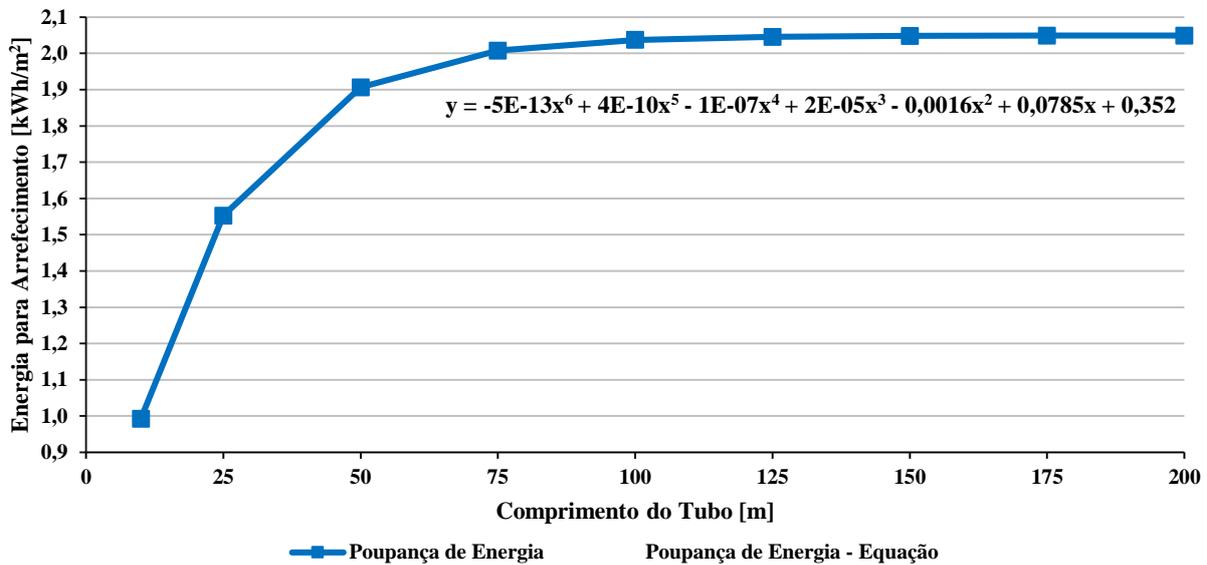


Figura 49 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação de comprimento do tubo

A diferença de consumo energético anual para aquecimento entre o sistema de climatização da situação base e o com o permutador de calor ar-solo é expressa no gráfico da Figura 50. Neste, nota-se que a redução do consumo energético para aquecimento é bastante impulsionada após a introdução de um tubo enterrado com comprimentos compreendidos entre os 10 e os 50 metros e sofre um abrandamento para comprimentos superiores a 75 metros, à semelhança do que acontecia para os dias mais frio e mais quente. A título de exemplo, com a introdução de um tubo enterrado com 50 metros de comprimento, verifica-se uma redução total dos consumos anuais para aquecimento de 836,21 kWh/m<sup>2</sup>.ano, comparativamente com o sistema de climatização sem o referido tubo, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 54%.

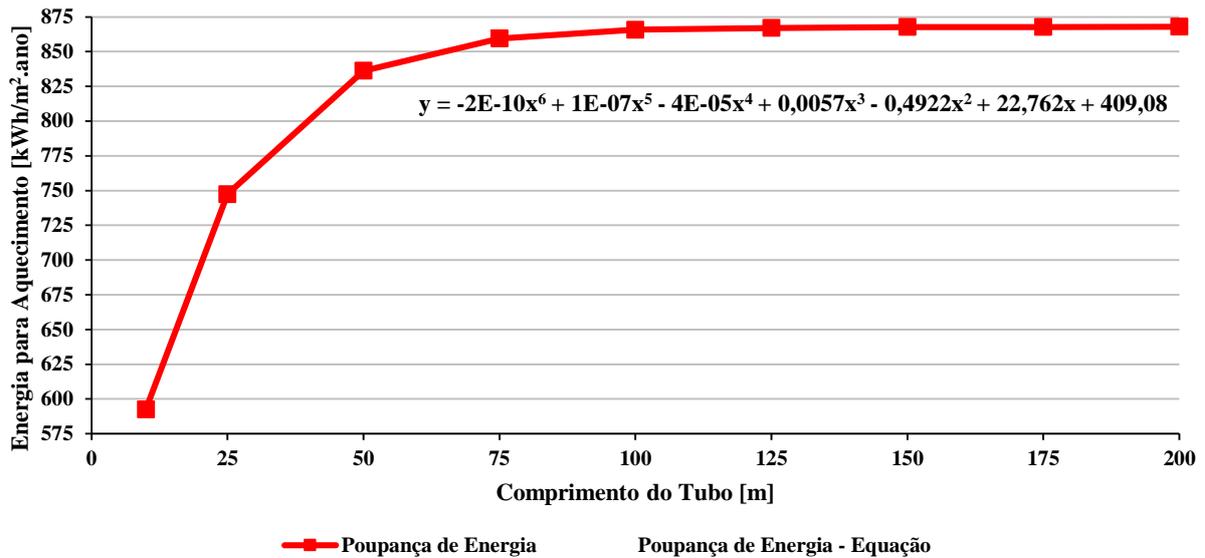


Figura 50 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado, consoante a variação de comprimento do tubo

Relativamente à diferença anual dos consumos energéticos para arrefecimento entre a situação base e a em que se introduz o sistema *EAHE*, pode-se concluir que a introdução do tubo enterrado no solo produz um impacto positivo no comportamento térmico da célula de teste. Como se pode observar no gráfico da Figura 51, os consumos energéticos diminuem, no geral, após a introdução de um tubo enterrado, sendo essa redução mais significativa para comprimentos do tubo entre os 10 e os 50 metros e menos significativa para comprimentos superiores a 75 metros. Para comprimentos de tubo de 10 e 50 metros verificam-se poupanças anuais de 57,94 e 81,34 kWh/m².ano que correspondem, respetivamente, a reduções percentuais de 8% e 12%.

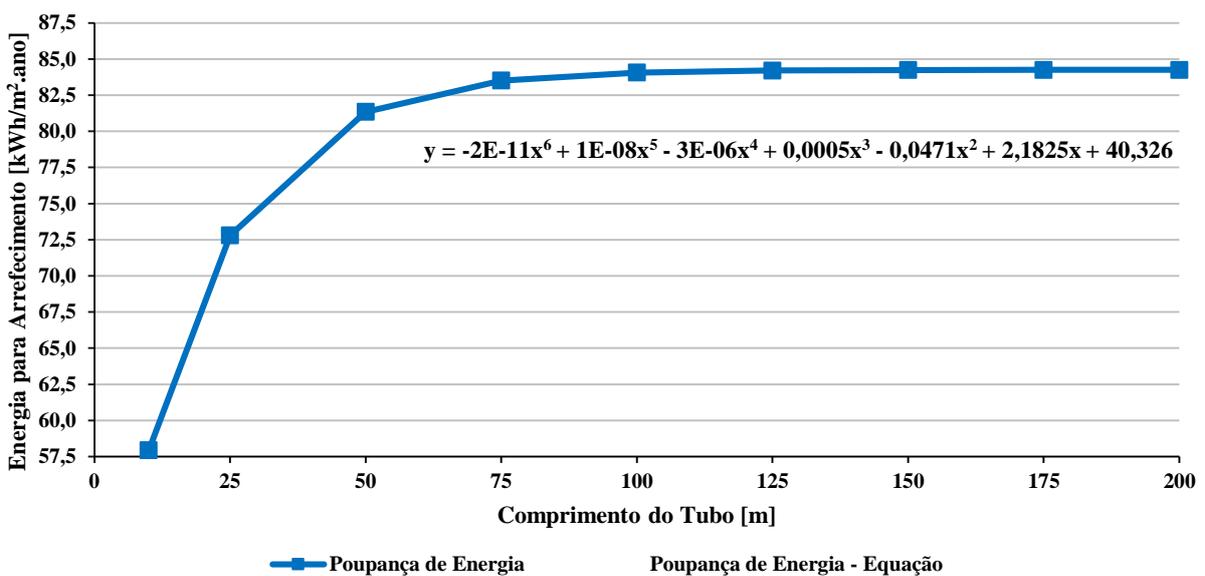


Figura 51 – Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados, consoante a variação de comprimento

### 4.1.1.3. Tubo de PVC

A partir da análise do gráfico da Figura 52, que expressa para o dia 2 de Janeiro a diferença entre os consumos de energia para aquecimento do sistema de climatização sem e com os tubos enterrados no solo, pode-se concluir que a introdução de comprimentos de tubo superiores a 75 metros deixa de apresentar uma variação significativa nos resultados, enquanto a introdução de comprimentos inferiores permite uma maior redução dos consumos energéticos. Verifica-se que a introdução de um tubo de PVC enterrado no solo proporciona uma redução do consumo energético para aquecimento que varia entre os 8,61, os 12,54 e os 13,11 kWh/m<sup>2</sup> para valores de comprimento de 10, 50 e 75 metros, que correspondem a reduções de 34%, 49% e 51%, respetivamente.

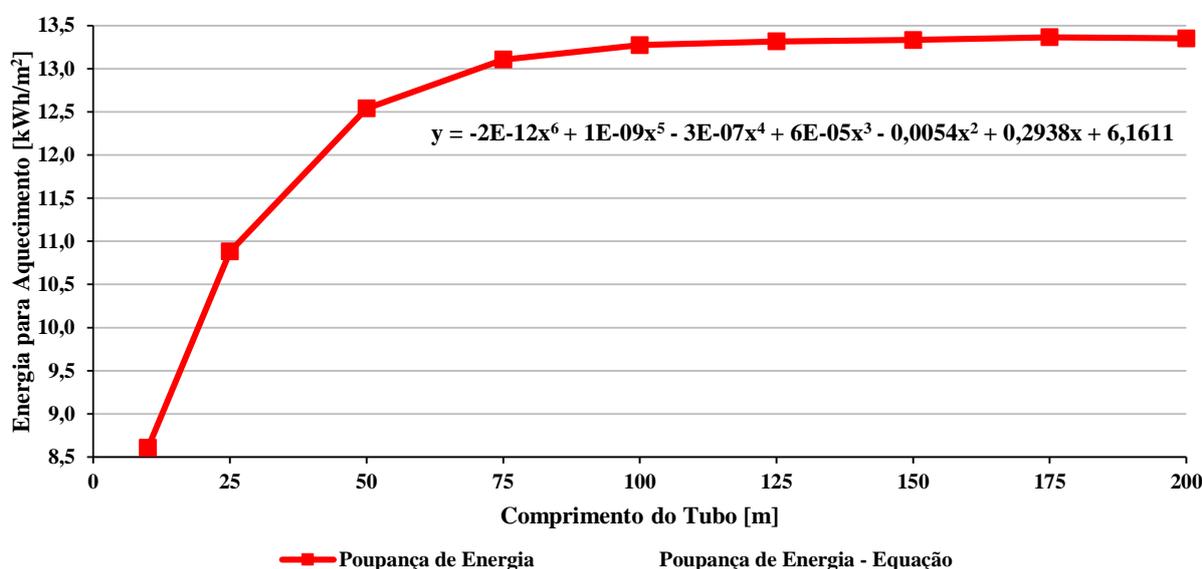


Figura 52 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados no dia 2 de Janeiro, consoante a variação de comprimento do tubo

No gráfico da Figura 53, representa-se a diferença entre os consumos energéticos para arrefecimento da situação padrão e da situação com permutador de calor ar-solo para o dia 10 de Agosto. No referido gráfico pode-se observar que o aumento do comprimento do tubo enterrado para valores superiores a 75 metros introduz reduções dos consumos energéticos menos significativas comparativamente a comprimentos inferiores. Neste aspeto, é de salientar a redução imposta pela introdução de um tubo de comprimento compreendido entre os 10 e os 50 metros, valores para os quais os consumos energéticos de arrefecimento sofrem uma redução de aproximadamente 0,88 e 1,82 kWh/m<sup>2</sup>, que correspondem, respetivamente, a reduções percentuais entre os 7% e os 15%.

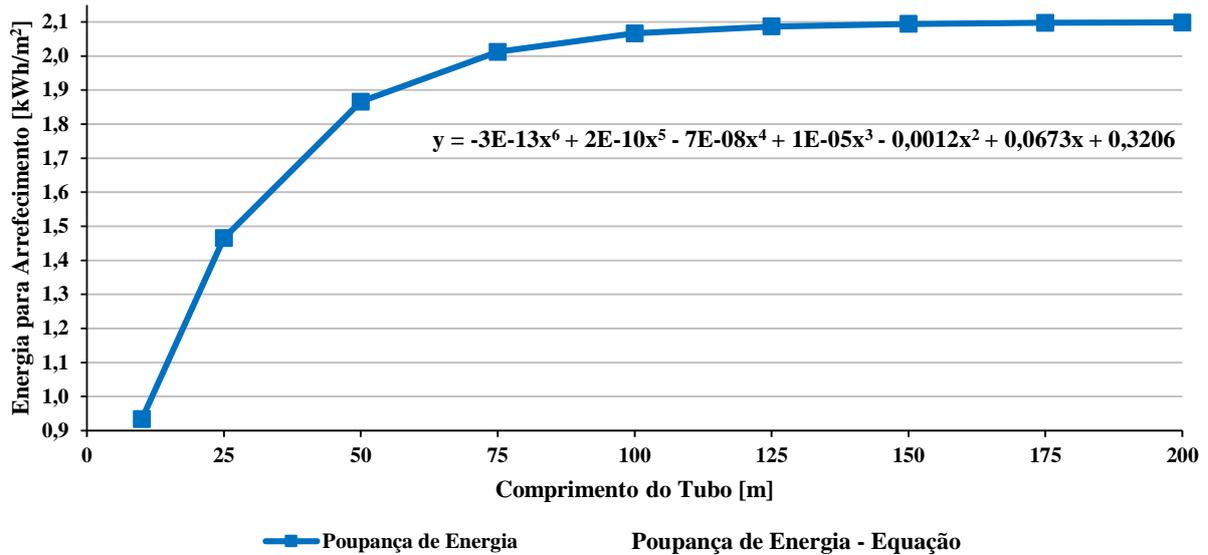


Figura 53 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados no dia 10 de Agosto, consoante a variação de comprimento do tubo

No gráfico da Figura 54 apresenta-se a diferença de consumo energético anual para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o permutador de calor ar-solo. A redução do consumo energético para aquecimento é bastante impulsionada após a introdução de um tubo enterrado com comprimentos compreendidos entre os 10 e os 50 metros e sofre um abrandamento para comprimentos superiores a 75 metros. A título de exemplo, com a introdução de um tubo enterrado com 50 metros de comprimento, verifica-se uma redução total dos consumos anuais para aquecimento de 818,32 kWh/m².ano, comparativamente com o sistema de climatização da situação base, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 53%.

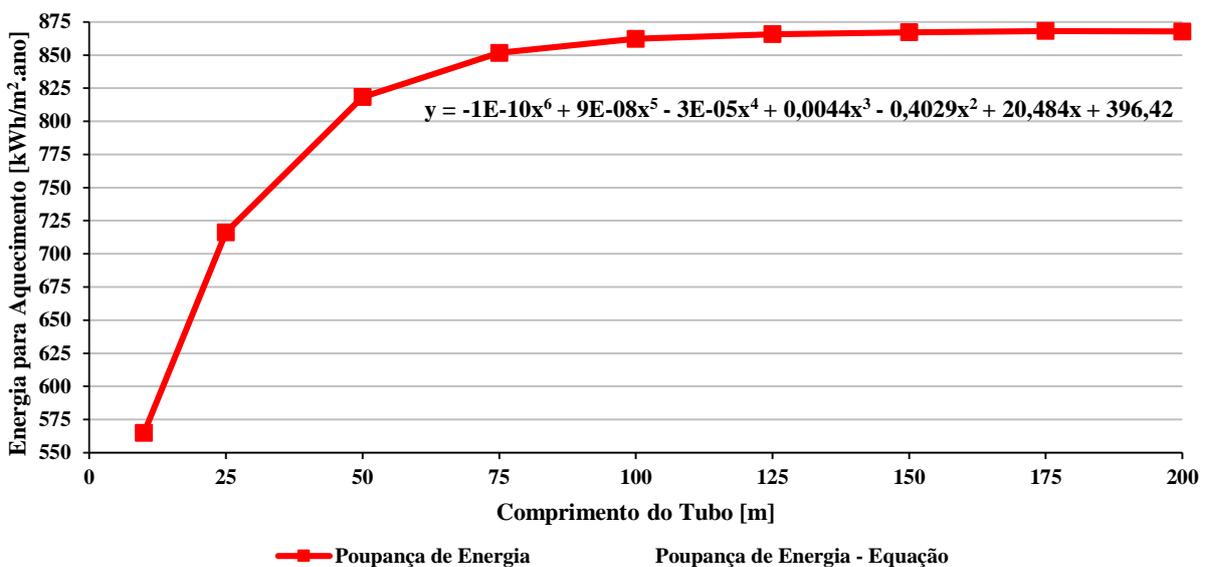


Figura 54 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados, consoante a variação do comprimento do tubo

A diferença anual dos consumos energéticos para arrefecimento entre a situação base e a introdução do permutador de calor ar-solo é representada no gráfico da Figura 55. No referido gráfico pode-se observar que os consumos energéticos sofrem uma redução significativa com a introdução do tubo enterrado no solo. A diferença de consumos energéticos entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado diminui com a introdução de comprimentos superiores a 75 metros. Até este valor verifica-se uma importante redução do consumo, nomeadamente se se considerar um tubo de PVC com comprimentos entre os 10 e os 50 metros, valores para os quais se verificam reduções anuais de 55,10 e 79,57 kWh/m<sup>2</sup>.ano que correspondem, respetivamente, a reduções percentuais de 8% e 11%.

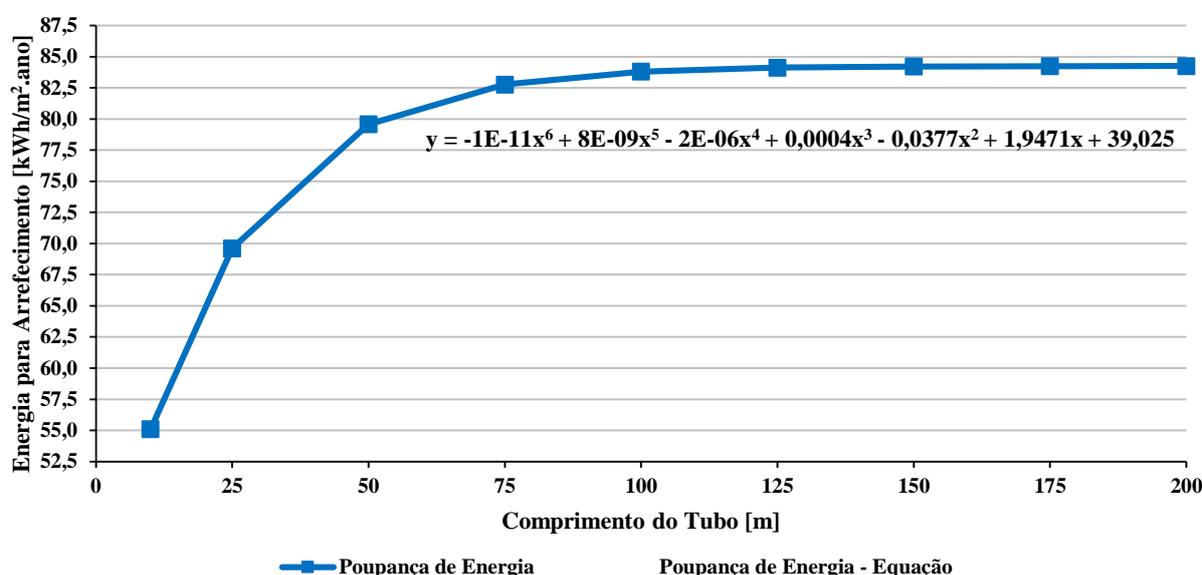


Figura 55 - Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados, consoante a variação de comprimento

Os gráficos das Figuras 102, 103, 104 e 105, apresentados nos Anexos, representam para a variação de comprimento do tubo de aço, respetivamente, o consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, o consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto e os consumos mensais de energia para aquecimento e arrefecimento. Nos gráficos das Figuras 106, 107, 108 e 109 são apresentados os resultados homólogos para a variação de comprimento do tubo de PVC.

#### 4.1.1.4. Comparação dos resultados obtidos com os diferentes tipos de tubos

Apresentados os gráficos individuais com as diferenças de consumos energéticos para aquecimento e arrefecimento entre a situação padrão e a presença do permutador de calor ar-solo,

descritos para cada tipo de material nos dias mais significativos e anualmente, apresentam-se nos gráficos das Figuras 56 e 57 as reduções anuais do consumo energético para aquecimento e arrefecimento proporcionadas pelos diversos comprimentos de tubo e materiais estudados. As equações presentes nos referidos gráficos, referentes às poupanças de energia para cada tipo de material, são apresentadas por ordem decrescente para o tubo de betão, de aço inox e de PVC, respetivamente.

Como se pode observar no gráfico da Figura 56, o material que proporciona a menor redução dos consumos energéticos de aquecimento nos comprimentos de tubo enterrados entre os 10 e os 75 metros é o PVC. Nesse mesmo intervalo de comprimentos pode-se concluir que a diferença obtida entre os tubos de aço inox e de betão é praticamente desprezável, embora o aço permita uma redução ligeiramente superior. Embora a diferença entre os três materiais seja anulada com o aumento do comprimento do tubo enterrado, sobretudo para comprimentos de tubo superiores a 75 metros, se se considerar um comprimento de tubo de 25 metros, então obtêm-se reduções de 747,40, 743,88 e 716,19 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o tubo de aço inox, de betão e de PVC, respetivamente.

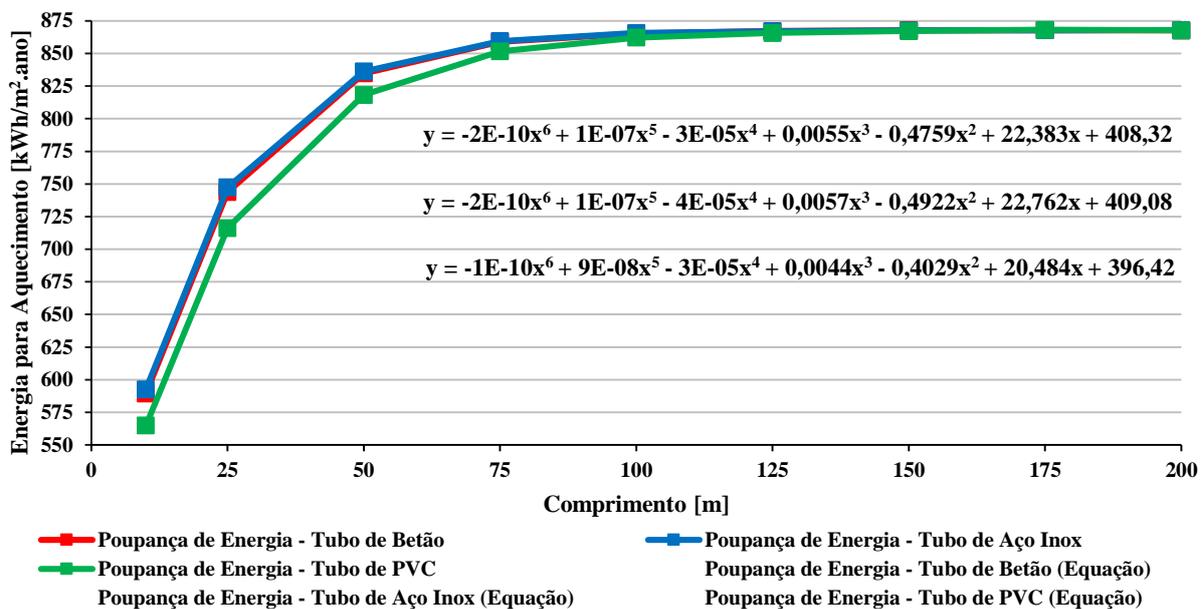


Figura 56 – Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para aquecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC

Na Tabela 24 apresentam-se as poupanças de energia para aquecimento proporcionadas por cada tipo de tubo enterrado, de acordo com o comprimento analisado. As poupanças de energia, apresentadas em percentagem, foram calculadas através da diferença de consumos energéticos entre o sistema de climatização sem e com o sistema *EAHE*, para cada um dos comprimentos analisados e de acordo com os materiais considerados.

Tabela 24 - Poupança nos consumos energéticos para aquecimento em função do tipo de material e do comprimento do tubo enterrado

Poupança de Energia para Aquecimento (%)									
Comprimento do tubo enterrado [m]									
Material	10	25	50	75	100	125	150	175	200
Betão	38	48	54	55	56	56	56	56	56
Aço Inox	38	48	54	55	56	56	56	56	56
PVC	36	46	53	55	56	56	56	56	56

No gráfico da Figura 57 são representadas as reduções dos consumos energéticos anuais de arrefecimento que cada material constituinte do tubo enterrado consegue proporcionar. Como se pode observar na figura abaixo, existem diferenças significativas entre os vários materiais até ao comprimento de 75 metros, com a redução proporcionada pelo tubo de PVC num nível inferior ao dos tubos de betão e aço. Para comprimentos superiores a 75 metros denota-se uma menor diferença entre o desempenho de cada tubo, com uma ligeira vantagem a favor do tubo de betão. Assim, tomando como referência as reduções obtidas com a introdução de um tubo com 25 metros de comprimento, verifica-se uma redução dos consumos energéticos de 73,00, 72,80 e 69,62 kWh/m<sup>2</sup>.ano para os tubos de betão, aço e PVC, respetivamente.

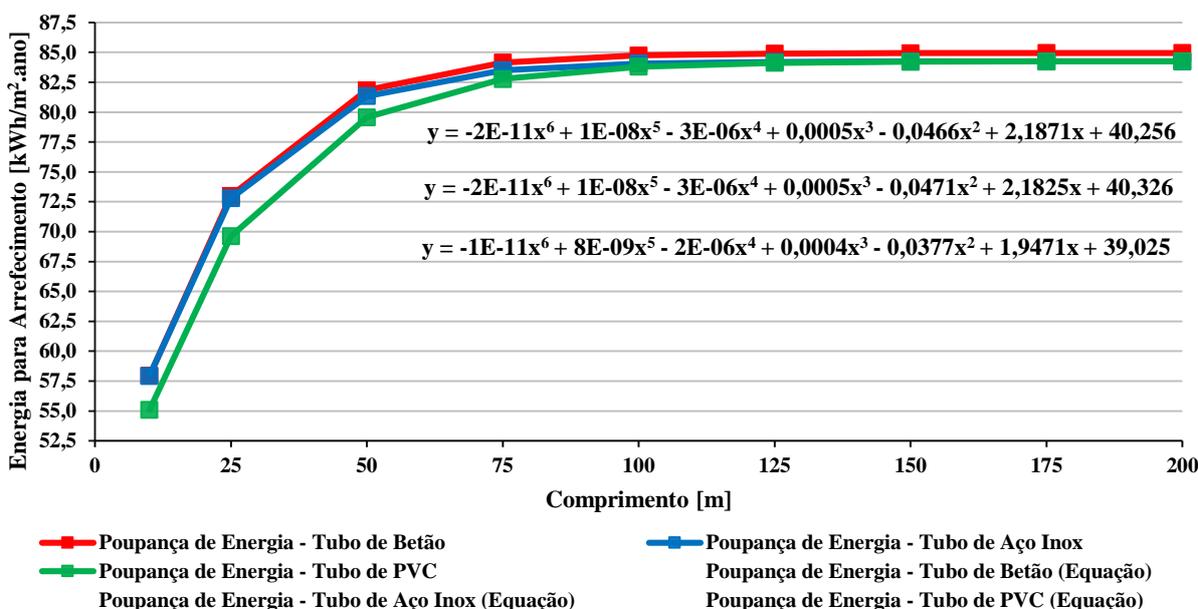


Figura 57 – Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para arrefecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC

As poupanças de energia para arrefecimento proporcionadas por cada tipo de tubo enterrado e de acordo com o comprimento analisado, são apresentadas na Tabela 25. As referidas poupanças são apresentadas em percentagem e foram calculadas através da diferença de consumos energéticos entre o sistema de climatização sem e com o sistema *EAHE*, para cada um dos comprimentos analisados e de acordo com os materiais considerados.

Tabela 25 - Poupança nos consumos energéticos para arrefecimento em função do tipo de material e do comprimento do tubo enterrado

<b>Poupança de Energia para Arrefecimento (%)</b>									
<b>Comprimento do tubo enterrado [m]</b>									
<b>Material</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>150</b>	<b>175</b>	<b>200</b>
<b>Betão</b>	8	10	12	12	12	12	12	12	12
<b>Aço Inox</b>	8	10	12	12	12	12	12	12	12
<b>PVC</b>	8	10	11	12	12	12	12	12	12

Após a análise atenta dos resultados é possível concluir que a gama de comprimentos de tubo enterrado recomendada para a célula de teste analisada varia entre os 50 e os 75 metros. Como se pode comprovar, para valores de comprimento de tubo enterrado superiores aos indicados, os benefícios em termos de desempenho energético do sistema têm tendência a estabilizar independentemente do incremento no comprimento. Para valores de comprimento inferiores aos da gama indicada já se obtêm resultados consideráveis mas, no entanto, podem ainda ser melhorados à medida que se aumenta o comprimento.

Caso o volume da célula de teste fosse aumentado, o comprimento do tubo enterrado também teria de ser aumentado visto que existe uma maior quantidade de ar no interior da célula de teste que necessita de ser climatizado. Assim, ao aumentar o comprimento do tubo enterrado o ar a circular no interior do tubo enterrado seria condicionado de forma mais efetiva para reduzir a carga térmica do edifício.

#### **4.1.2. Variação do diâmetro**

Os resultados referentes ao estudo da influência da variação do diâmetro do tubo enterrado, apresentados de seguida, foram obtidos assumindo valores fixos para a profundidade e o

comprimento do tubo. Assim, para cada conjunto de diâmetros e materiais analisados, foram considerados um comprimento de 100 metros e uma profundidade de 4,00 metros.

#### 4.1.2.1. Tubo de Betão

O gráfico da Figura 58 expressa o consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro (dia mais frio do ano) e mostra como este varia em função do diâmetro do tubo enterrado. Após a introdução do permutador de calor ar-solo, os consumos de energia para aquecimento sofrem uma redução ao longo de todo o dia. Esta redução de consumo é mais evidente no decorrer da hora mais fria (verificada às 08:00), na qual o consumo de energia desce dos 1,72 kWh/m<sup>2</sup> da situação base para os 0,93 kWh/m<sup>2</sup> quando é introduzido um tubo com 0,30 metros de diâmetro. No decorrer da hora que apresenta a temperatura diária exterior mais elevada (que ocorre às 15:00) verifica-se também uma redução do consumo de energia dos 0,35 kWh/m<sup>2</sup> para os 0,13 kWh/m<sup>2</sup>, igualmente para a situação base e para a que é introduzido um tubo enterrado com 0,30 metros de diâmetro. Pode-se então verificar que, com a introdução de um tubo enterrado no solo com 0,30 metros de diâmetro, os consumos energéticos para aquecimento descem aproximadamente 46% e 62% para as horas mais fria e mais quente, respetivamente. Nas restantes horas também se verifica uma descida significativa dos consumos energéticos, ocorrendo as maiores reduções nos períodos de temperatura exterior mais baixa e para os diâmetros inferiores.

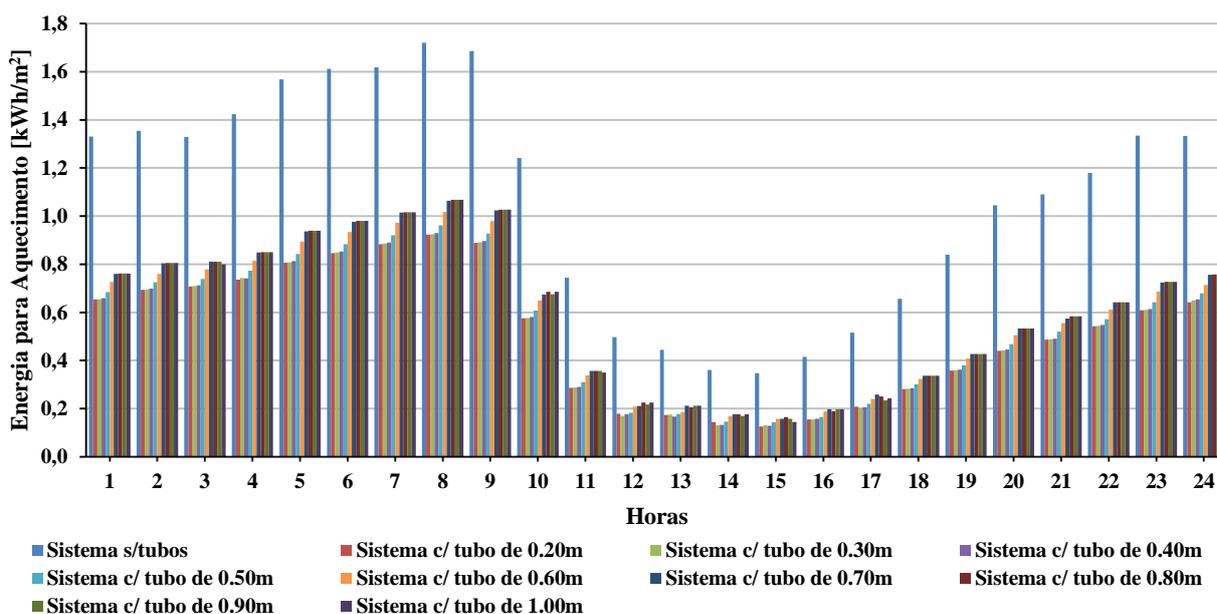


Figura 58 - Variação do consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, consoante o diâmetro do tubo enterrado

A partir da análise do gráfico da Figura 59, no qual se apresenta a diferença entre os consumos do sistema de climatização da situação base e com os tubos enterrados no solo, pode-se concluir que a introdução de tubos com diâmetros superiores a 0,40 metros conduz a uma diminuição significativa da eficiência do permutador de calor ar-solo. Até este valor de diâmetro, verifica-se que a introdução de um tubo enterrado no solo proporciona uma redução do consumo energético para aquecimento que varia entre os 13,34 kWh/m<sup>2</sup> e os 13,26 kWh/m<sup>2</sup> para valores de diâmetro de 0,20 e 0,40 metros, que correspondem a reduções de aproximadamente 52% em ambos os casos.

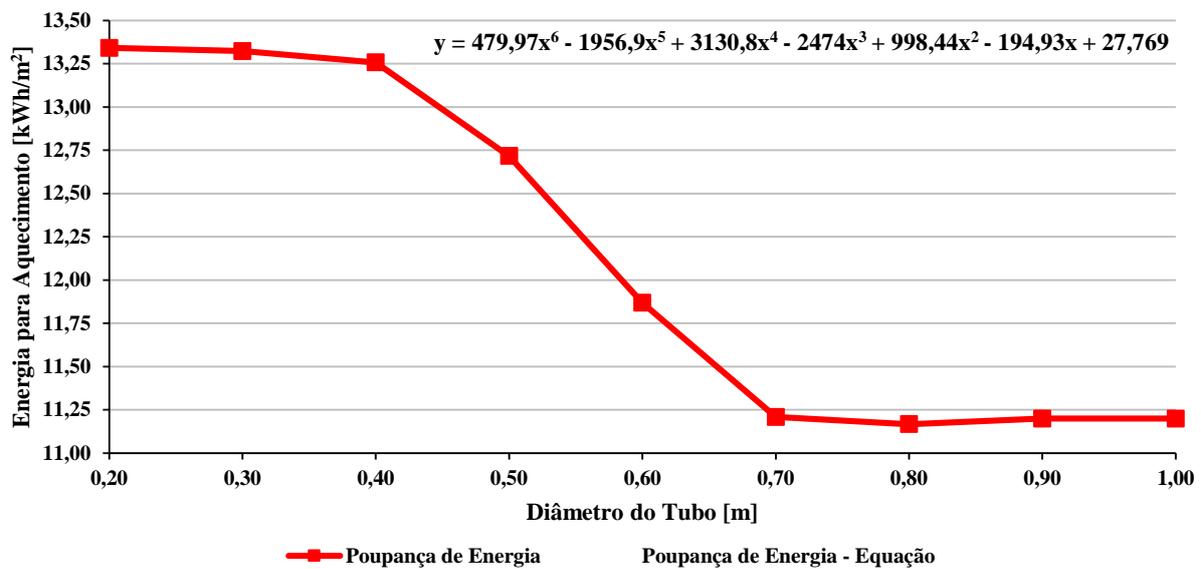


Figura 59 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação do diâmetro

No gráfico da Figura 60 apresentam-se os consumos energéticos horários de arrefecimento para o dia mais quente do ano. Após a sua análise pode-se concluir que os referidos consumos sofrem uma redução com a introdução do tubo enterrado no solo ao longo de todo o dia mais quente do ano. Ao introduzir um tubo de betão com 0,30 metros de diâmetro, verifica-se que o consumo de energia para arrefecimento no decorrer da hora mais quente do dia (12:00) diminui dos 0,93 para os 0,80 kWh/m<sup>2</sup> e é anulado no decorrer da hora mais fria do dia (06:00), quando sem o sistema de permutador de calor ar-solo havia um consumo de 0,03 kWh/m<sup>2</sup>. Estas reduções correspondem a uma quebra no consumo de energia de aproximadamente 14% e 1% com a introdução do referido sistema. Nas restantes horas do dia verificam-se igualmente reduções dos consumos energéticos, sendo estas mais acentuadas nos períodos do dia em que as temperaturas exteriores são mais elevadas e mais reduzidas no período noturno.

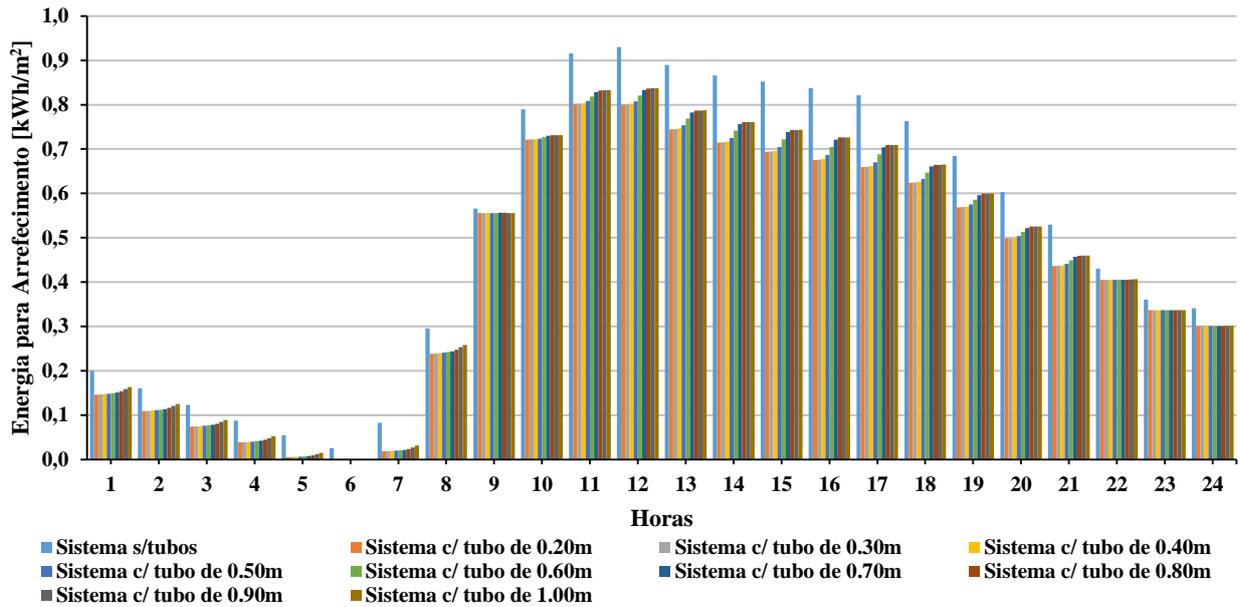


Figura 60 - Variação do consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, consoante o diâmetro do tubo enterrado

Ao analisar o gráfico da Figura 61, no qual se apresenta a diferença entre os consumos energéticos para arrefecimento do sistema de ventilação sem e com os tubos enterrados no solo, pode-se concluir que a introdução de tubos com diâmetros superiores a 0,40 metros representa uma atenuação significativa no desempenho do sistema. Até este valor de diâmetro, verifica-se que a introdução de um tubo enterrado no solo proporciona uma redução do consumo energético para arrefecimento que varia entre os 2,05 e os 2,02 kWh/m<sup>2</sup> para valores de diâmetro de 0,20 e 0,40 metros, que correspondem a reduções de 12% em ambos os casos.

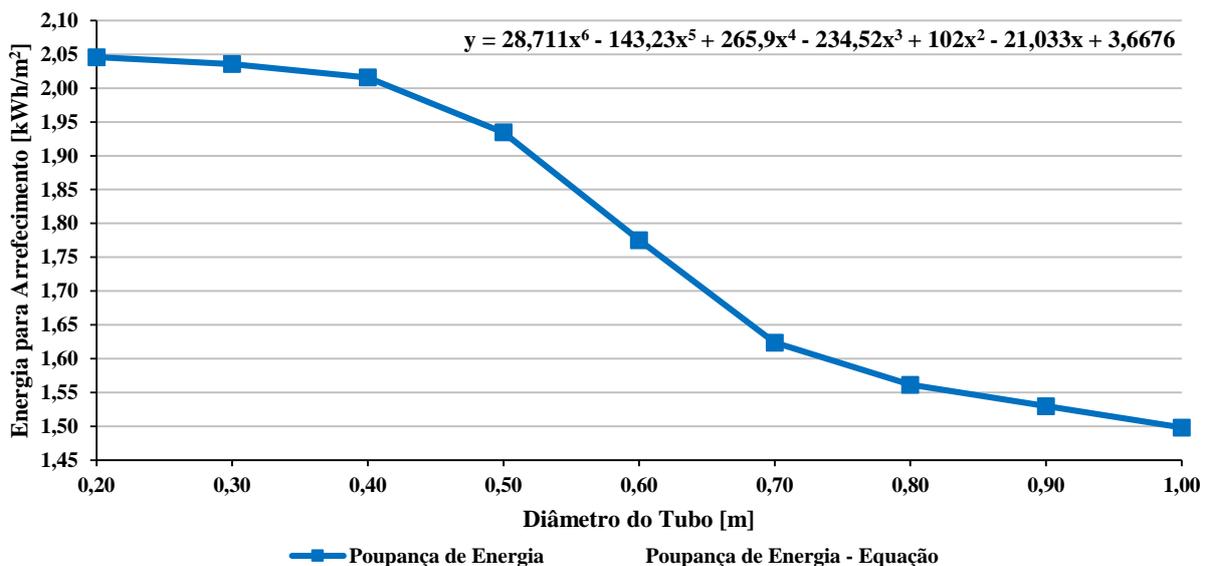


Figura 61 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação do diâmetro do tubo

No gráfico da Figura 62 está representada a variação mensal do consumo de energia para aquecimento e, após a sua análise, é possível verificar a influência positiva da introdução do sistema de permutador de calor ar-solo na manutenção das condições de conforto térmico no interior do edifício. No caso de Janeiro, o mês mais frio do ano, o somatório dos consumos energéticos para aquecimento desce dos 490,38 para os 253,19 kWh/m<sup>2</sup>.mês, nas situações referentes ao sistema de climatização sem e com um tubo enterrado com 0,30 metros de diâmetro, respetivamente. A redução do consumo de energia correspondente é de aproximadamente 48%. Nos restantes meses em que é necessário aquecer o ambiente interior, verifica-se igualmente uma redução acentuada dos consumos energéticos que vai diminuindo à medida que se aumenta o diâmetro do tubo enterrado.

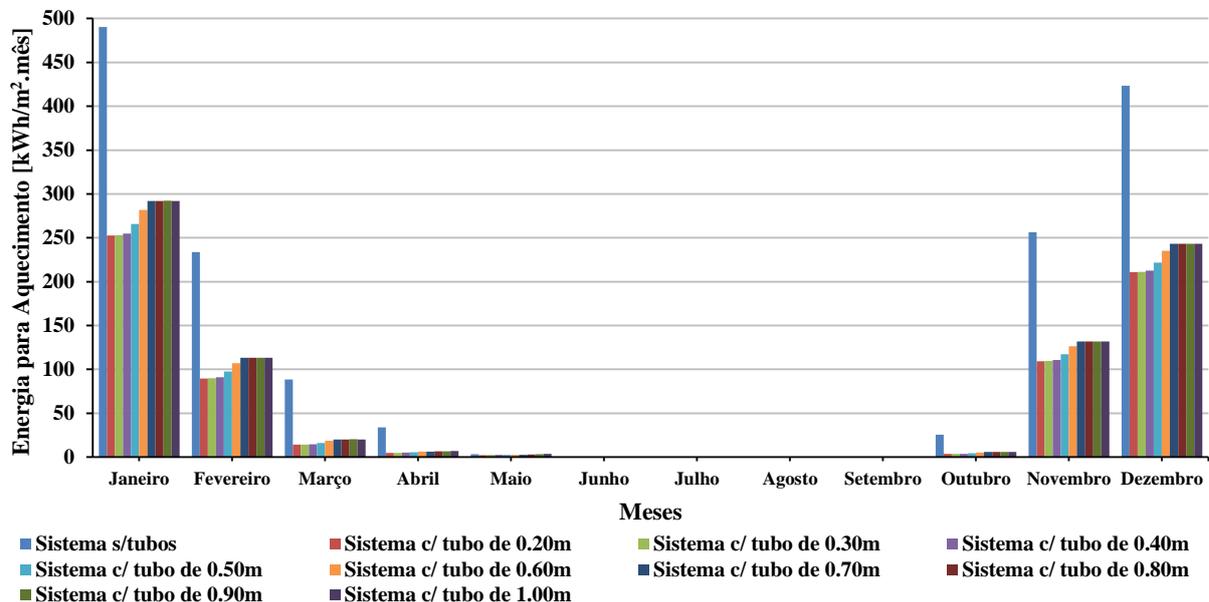


Figura 62 - Variação mensal do consumo de energia para aquecimento, consoante o diâmetro do tubo enterrado

No gráfico da Figura 63 está representada a diferença dos consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o permutador de calor ar-solo. A redução do consumo energético para aquecimento é impulsionada após a introdução de um tubo enterrado com diâmetros compreendidos entre os 0,20 e os 0,40 metros e é menos significativa para diâmetros superiores a este último. A título de exemplo, com a introdução de um tubo enterrado com 0,30 metros de diâmetro, verifica-se uma redução total dos consumos anuais para aquecimento de 865,37 kWh/m<sup>2</sup>.ano, comparativamente com o sistema de climatização da situação base, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 56%.

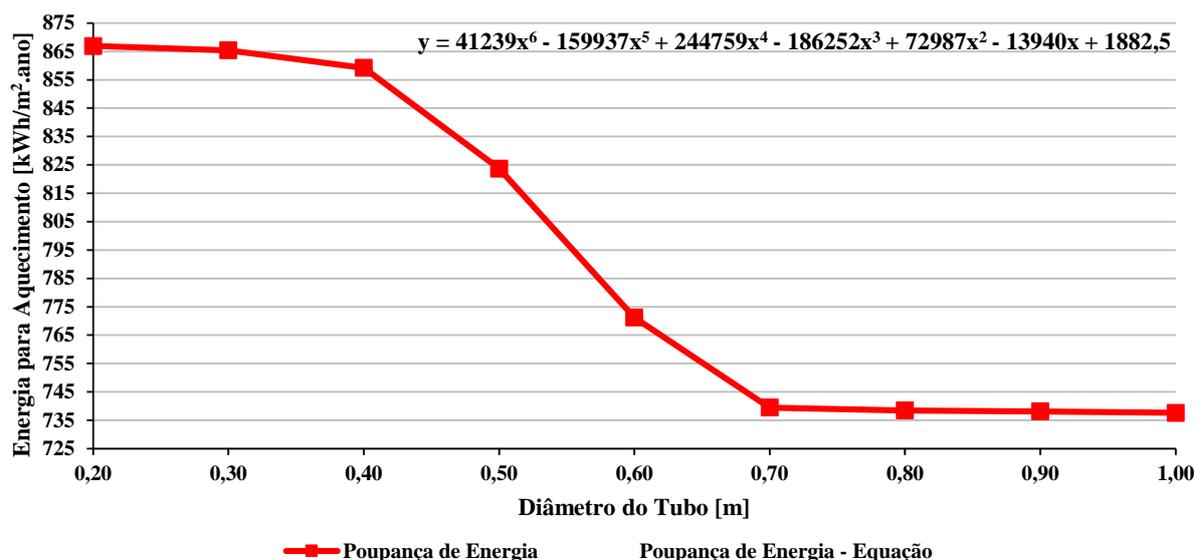


Figura 63 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados, consoante a variação do diâmetro do tubo

A variação dos consumos energéticos mensais para arrefecimento do sistema de climatização com e sem o tubo enterrado no solo é representada na Figura 64. Como se pode observar no referido gráfico, o consumo energético para arrefecimento sofre uma redução, com a introdução do permutador de calor ar-solo, em todos os meses em que é necessário arrefecer o ambiente interior, sendo esta redução mais elevada nos meses com temperaturas do ar mais elevadas (Junho, Julho e Agosto). No decorrer do mês com temperaturas mais elevadas, o mês de Julho, ocorre uma redução dos consumos energéticos dos 180,58 kWh/m<sup>2</sup>.mês do sistema de climatização da situação base, para os 149,79 kWh/m<sup>2</sup>.mês do sistema de climatização com um tubo enterrado de 0,30 metros de diâmetro. Esta redução é de aproximadamente 17%.

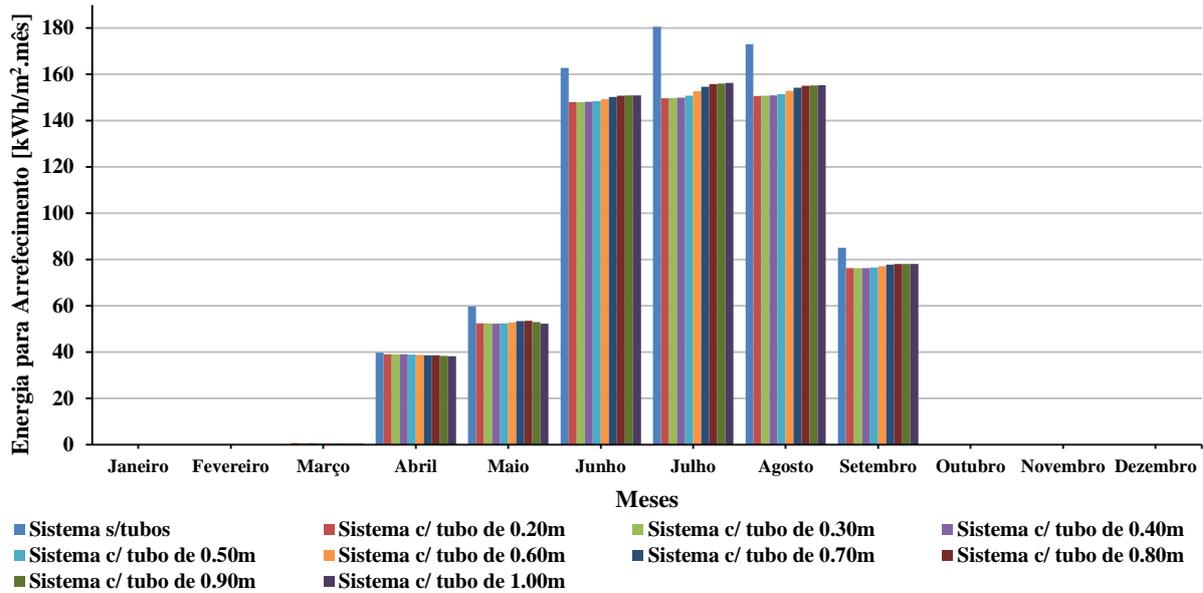


Figura 64 - Variação mensal do consumo de energia para arrefecimento, consoante o diâmetro do tubo enterrado

Da análise ao gráfico da Figura 65, no qual está apresentada a diferença anual dos consumos energéticos para arrefecimento, pode-se observar a redução dos consumos com a introdução do tubo enterrado no solo comparativamente à situação base. A diferença de consumos energéticos entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado diminui com a introdução de diâmetros superiores a 0,40 metros. Até este valor verifica-se uma redução do consumo, especialmente se se considerar um tubo com diâmetros entre os 0,20 e os 0,40 metros, valores para os quais se verificam reduções anuais de 84,22 e 83,63 kWh/m<sup>2</sup>.ano que correspondem, respetivamente, a reduções percentuais de 12% em ambos os casos.

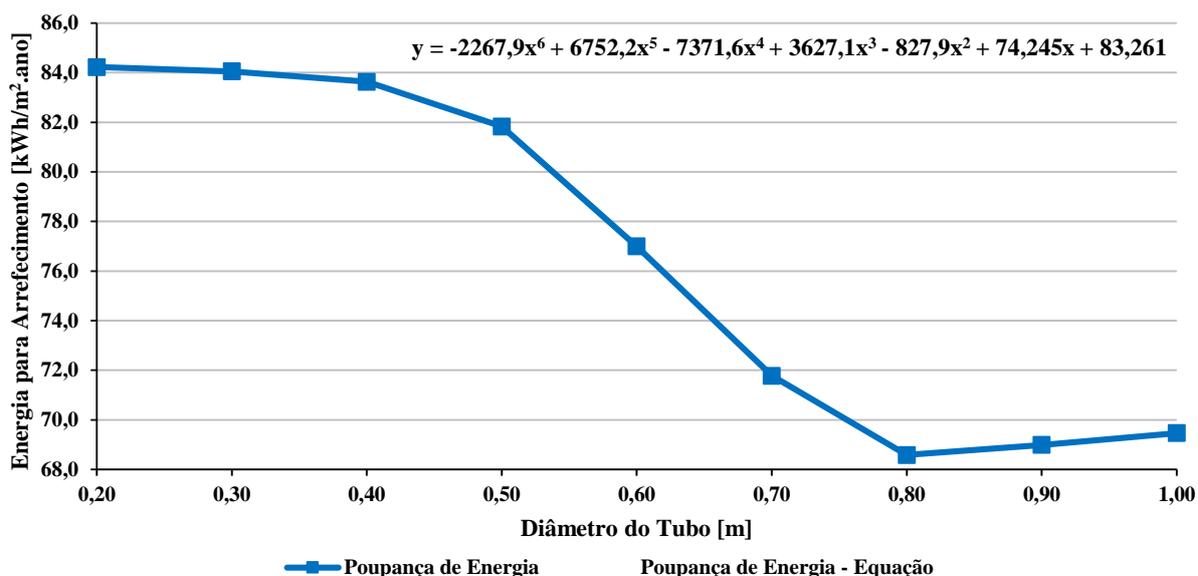


Figura 65 - Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de climatização sem e com tubos enterrados, consoante a variação do diâmetro do tubo

#### 4.1.2.2. Tubo de Aço Inox

A partir da análise do gráfico da Figura 66, no qual se apresenta a diferença entre os consumos de aquecimento do sistema de climatização sem e com os tubos enterrados no solo, pode-se concluir que a introdução de tubos com diâmetros superiores a 0,40 metros representa uma diminuição significativa da eficiência do permutador de calor ar-solo. Até este valor de diâmetro, verifica-se que a introdução de um tubo enterrado no solo proporciona uma redução do consumo energético para aquecimento que varia entre os 13,38 e os 13,25 kWh/m<sup>2</sup> para valores de diâmetro de 0,20 e 0,40 metros, que correspondem a reduções de 52%, em ambas as situações.

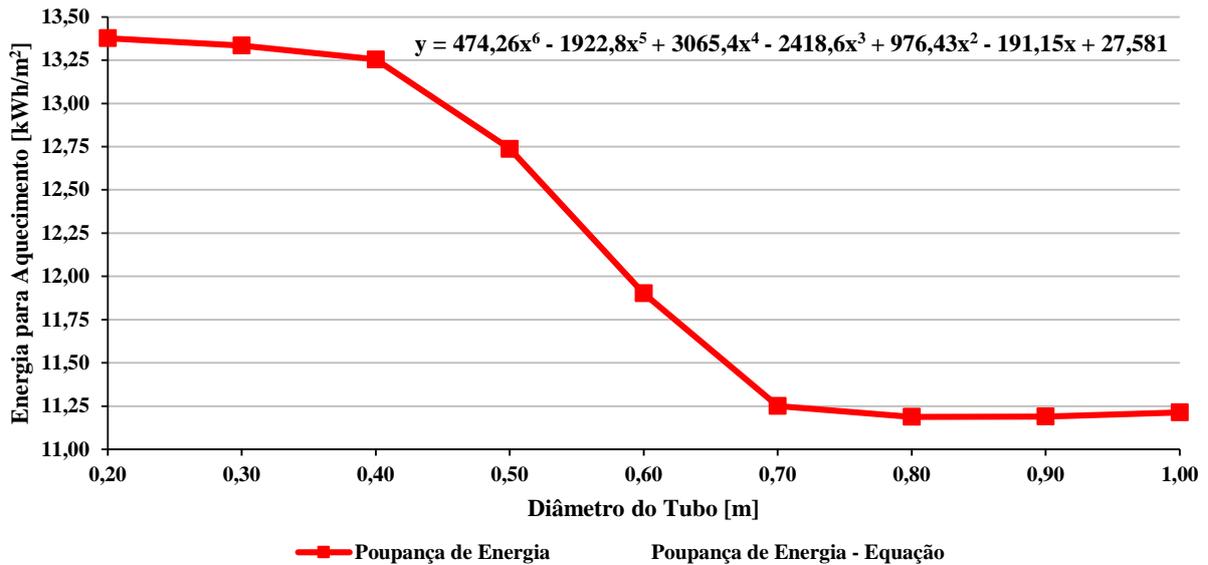


Figura 66 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação do diâmetro do tubo

O gráfico da Figura 67, no qual se representa a diferença entre os consumos energéticos de arrefecimento do sistema de climatização sem e com o tubo enterrado no solo para o dia 10 de Agosto, permite verificar que a introdução de tubos com diâmetros superiores a 0,40 metros implica um desempenho inferior do sistema *EAHE*. Até este valor de diâmetro, verifica-se que a introdução de um tubo enterrado no solo proporciona uma redução do consumo energético para arrefecimento igual a 2,02 kWh/m<sup>2</sup> para o diâmetro de 0,40 metros, que corresponde a uma redução de 17%.

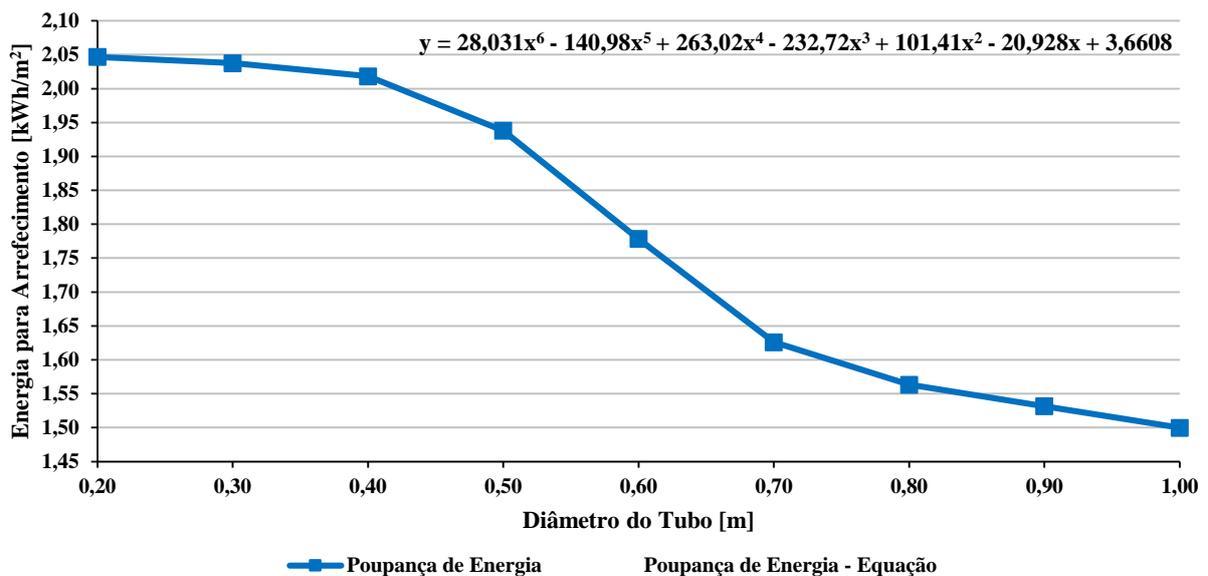


Figura 67 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante o diâmetro do tubo

A diferença de consumo energético anual para aquecimento entre o sistema de climatização sem e com o permutador de calor ar-solo é representada no gráfico da Figura 68. O consumo energético para aquecimento é reduzido após a introdução de um tubo enterrado com diâmetros até aos 0,40 metros e sofre um abrandamento para diâmetros superiores. Com a introdução de um tubo enterrado com 0,30 metros de diâmetro, verifica-se uma redução total dos consumos anuais para aquecimento de 865,95 kWh/m<sup>2</sup>.ano, comparativamente com o sistema de climatização da situação base, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 56%.

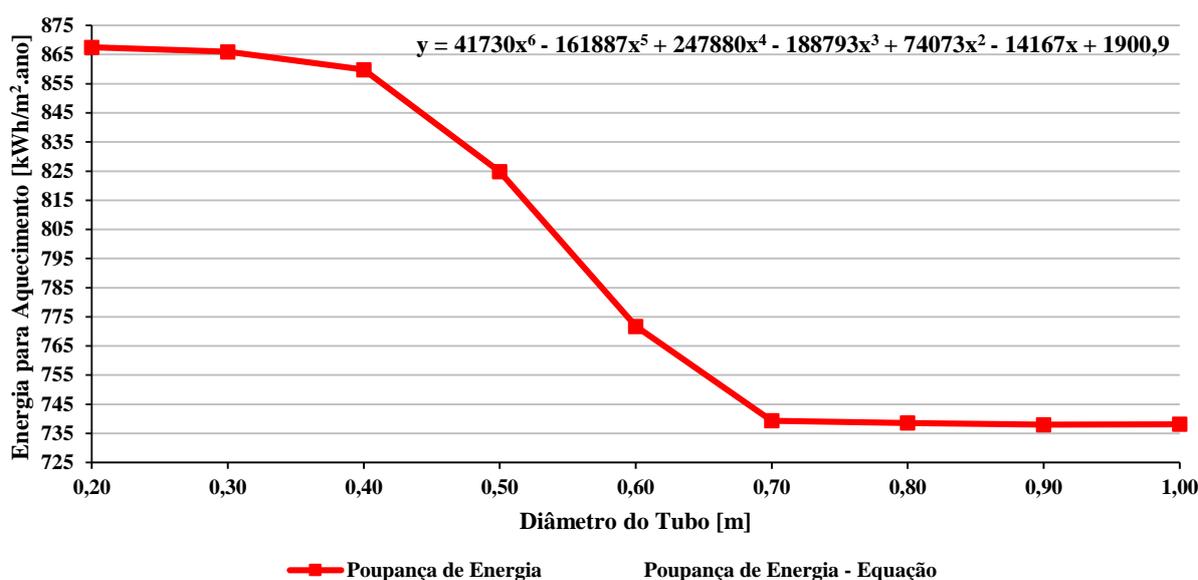


Figura 68 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrados, consoante o diâmetro do tubo

Ao analisar o gráfico da Figura 69, no qual é apresentada a diferença anual dos consumos energéticos para arrefecimento, pode-se observar a redução dos consumos com a introdução do tubo enterrado no solo. A diferença de consumos energéticos entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado diminui com a introdução de diâmetros superiores a 0,40 metros. Considerando um tubo com diâmetro de 0,40 metros verifica-se uma redução anual de 83,67 kWh/m<sup>2</sup>.ano, que corresponde a uma redução percentual de 12%.

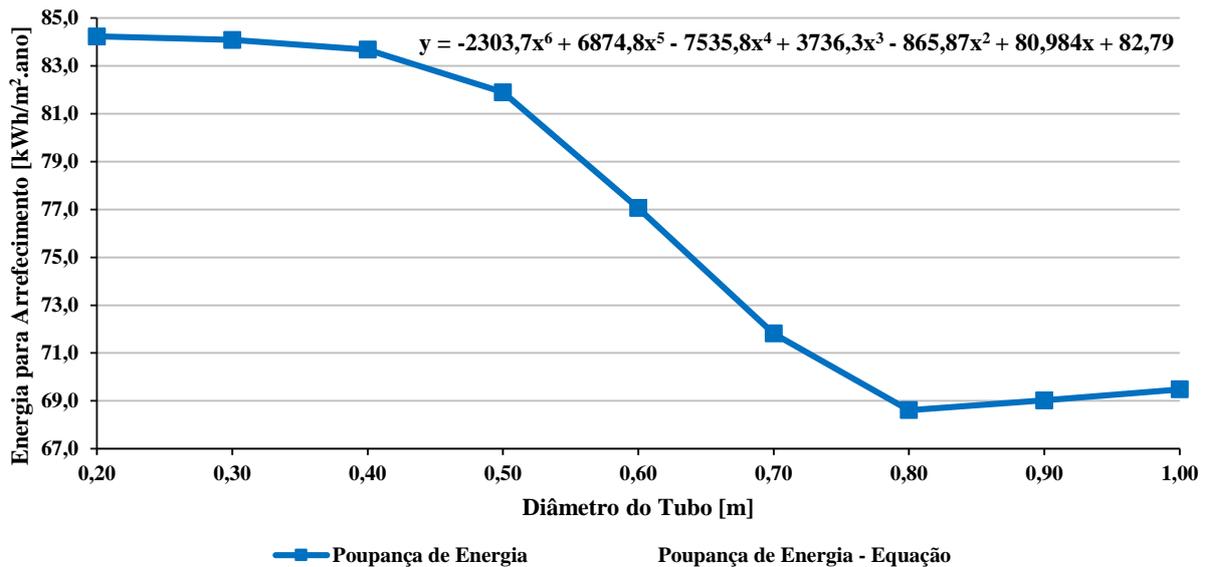


Figura 69 - Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante o diâmetro do tubo

#### 4.1.2.3. Tubo de PVC

A partir da análise do gráfico da Figura 70, no qual se expressa a diferença entre os consumos do sistema de climatização da situação base e com o permutador de calor ar-solo para o dia 2 de Janeiro, pode-se concluir que a introdução de um tubo de PVC com diâmetros superiores a 0,40 metros representa uma diminuição significativa da eficiência do permutador de calor ar-solo. Até este valor de diâmetro, verifica-se que a introdução de um tubo enterrado no solo proporciona uma redução do consumo energético anual para aquecimento para valores de diâmetro de 0,20 e 0,40 metros, que correspondem a reduções de aproximadamente 52% e 51%, respetivamente. Ao introduzir um tubo enterrado com um diâmetro de 1,00 metros verifica-se uma redução do consumo energético de 11,15 kWh/m<sup>2</sup>, o equivalente a uma redução percentual de aproximadamente 43%.

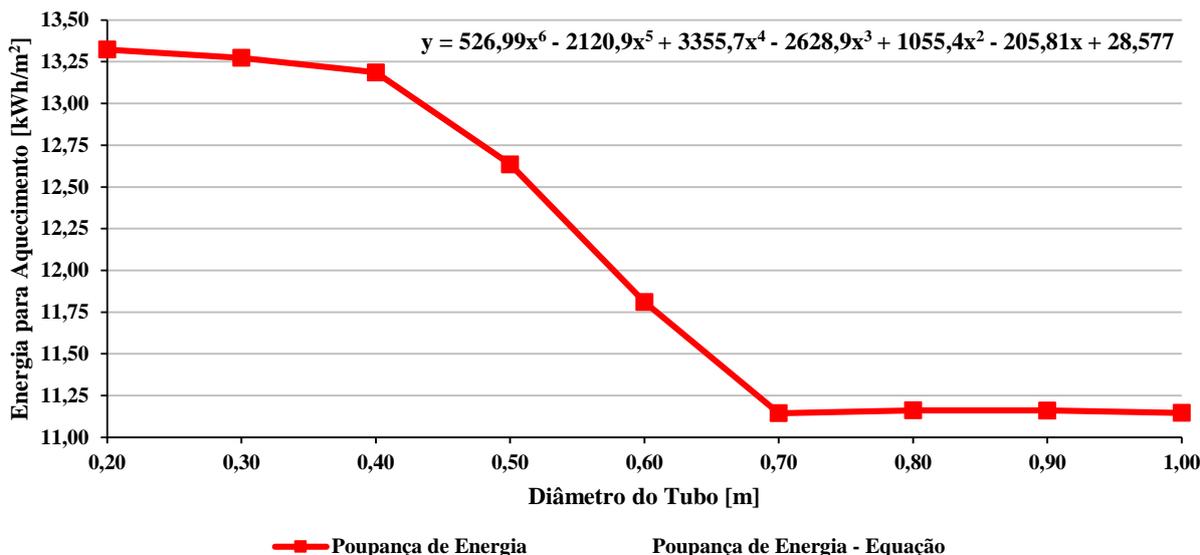


Figura 70 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação do diâmetro do tubo

No gráfico da Figura 71 está representada a diferença entre os consumos energéticos de arrefecimento do sistema de climatização da situação base e do sistema com os tubos enterrados no solo para o dia 10 de Agosto. O referido gráfico permite concluir que a introdução de tubos com diâmetros superiores a 0,40 metros proporciona reduções inferiores dos consumos, quando comparados com diâmetros mais pequenos. Para valores de diâmetro de 0,20, 0,40 e 1,00 metros, verifica-se que a introdução de um tubo enterrado no solo proporciona uma redução do consumo energético para arrefecimento que varia aproximadamente entre os 2,02 e os 1,50 kWh/m², que correspondem a reduções entre os 17% e os 12%.

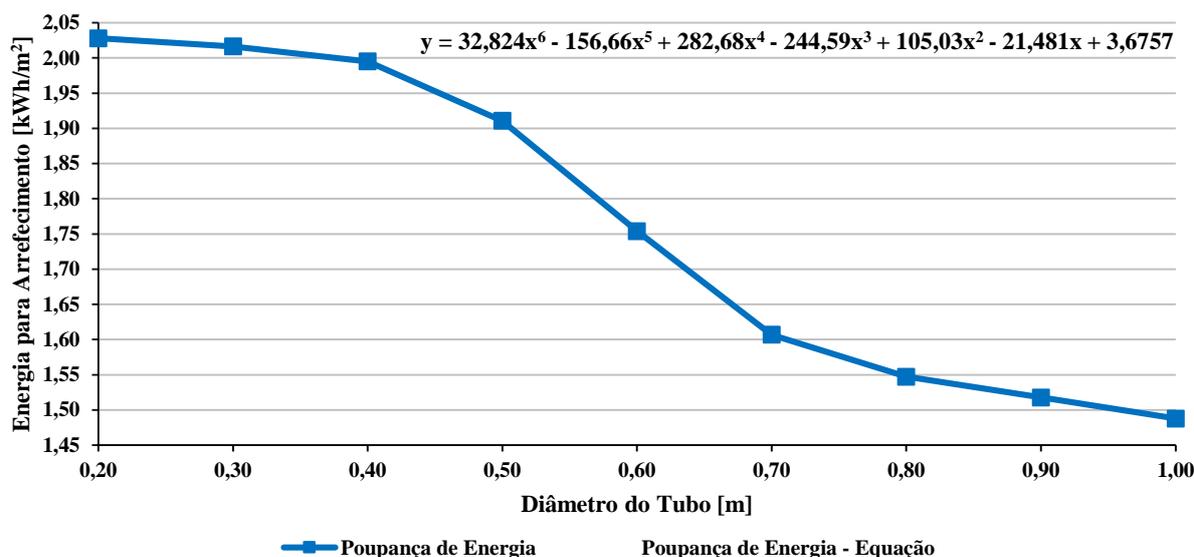


Figura 71 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação do diâmetro do tubo

No gráfico da Figura 72 representa-se a diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de climatização da situação base e com o permutador de calor ar-solo. A redução do consumo energético para aquecimento é acentuada após a introdução de um tubo enterrado com diâmetros compreendidos entre os 0,20 e os 0,40 metros e sofre uma ligeira atenuação para diâmetros superiores a este último. A introdução de um tubo enterrado com 0,30 metros de diâmetro proporciona uma redução dos consumos anuais para aquecimento de 862,24 kWh/m<sup>2</sup>.ano, comparativamente com o sistema de climatização da situação padrão, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 56%.

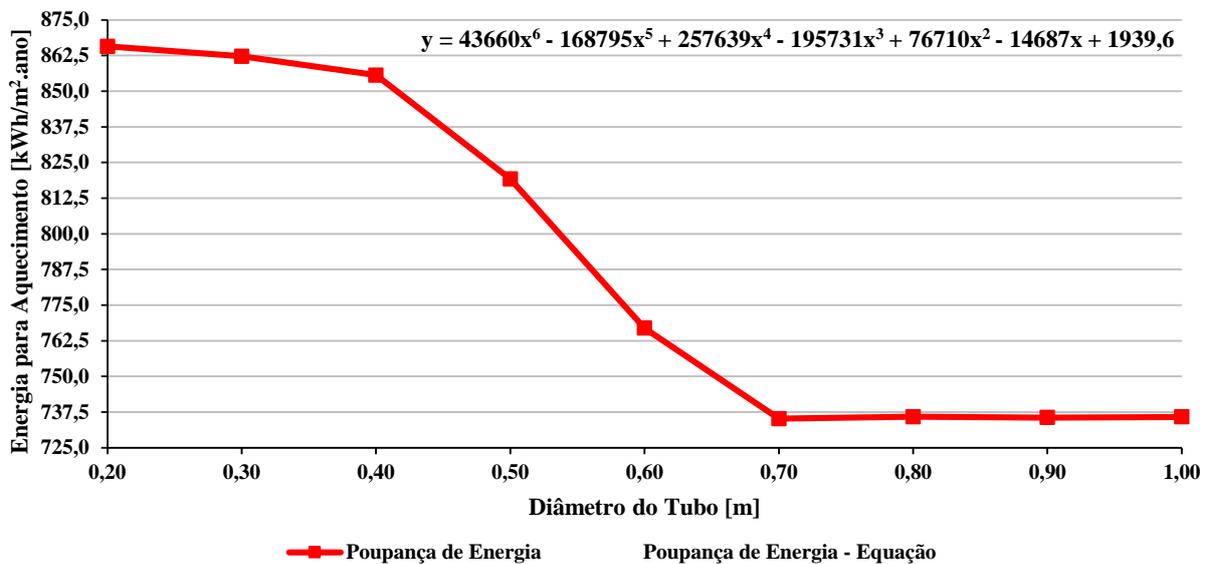


Figura 72 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante o diâmetro do tubo enterrado

Ao analisar o gráfico da Figura 73, no qual é apresentada a diferença anual dos consumos energéticos para arrefecimento, pode-se verificar a redução dos consumos energéticos com a introdução do tubo de PVC enterrado no solo. A diferença de consumos energéticos entre o sistema de climatização sem e com o tubo enterrado diminui com a introdução de diâmetros superiores a 0,40 metros. Até este valor verifica-se uma redução significativa do consumo, nomeadamente se se considerar um tubo com diâmetros entre os 0,20 e os 0,40 metros, valores para os quais se verificam reduções anuais de 84,08 e 83,31 kWh/m<sup>2</sup>.ano que correspondem a reduções de 12%. Já a introdução de um tubo com diâmetro de 1,00 metros proporciona a redução dos consumos energéticos de 69,25 kWh/m<sup>2</sup>.ano, o que corresponde a uma redução de 10% comparativamente à situação base.

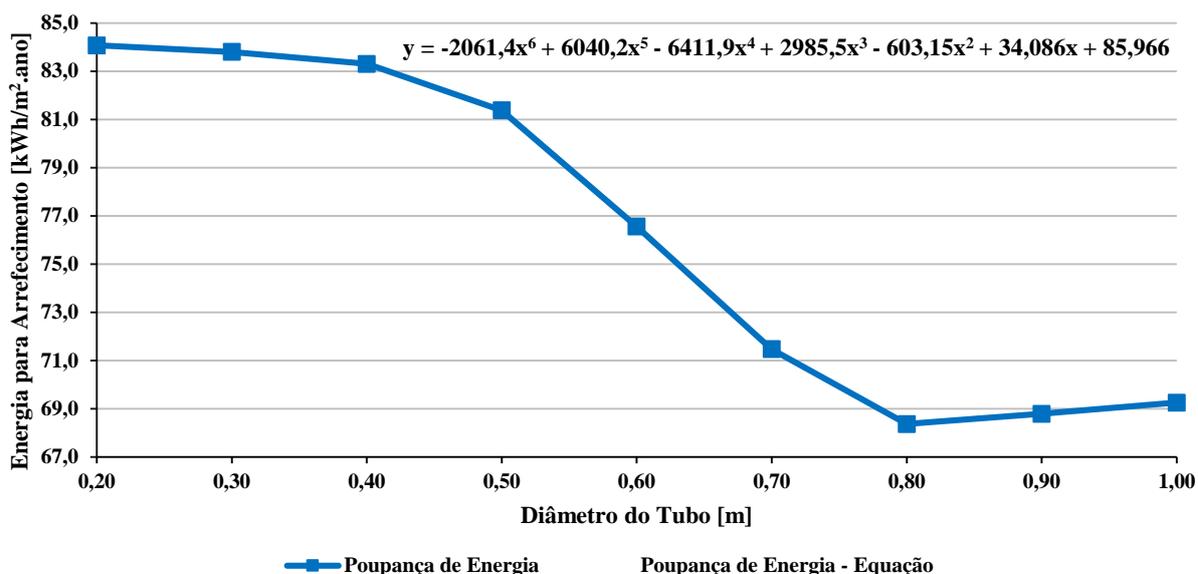


Figura 73 - Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante o diâmetro do tubo

No capítulo Anexos são apresentados os gráficos das Figuras 110, 111, 112 e 113, os quais representam para a variação de diâmetro do tubo de aço inox, respetivamente, o consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, o consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto e os consumos mensais de energia para aquecimento e arrefecimento. Por sua vez, nos gráficos das Figuras 114, 115, 116 e 117 são apresentados os resultados homólogos para a variação de diâmetro do tubo de PVC.

#### 4.1.2.4. Comparação dos resultados obtidos com os diferentes tipos de tubos

Terminada a apresentação dos resultados dos consumos energéticos correspondentes à variação do diâmetro consoante o material constituinte do tubo enterrado no solo, apresentados para os dias mais quente e mais frio e no decorrer de um ano completo, são apresentadas nos gráficos das Figuras 74 e 75, as comparações das reduções anuais dos consumos para aquecimento e arrefecimento entre os tipos de materiais do tubo estudados. As equações presentes nos referidos gráficos, referentes às poupanças de energia para cada tipo de material, são apresentadas por ordem descendente para o tubo de betão, de aço inox e de PVC, respetivamente.

Como se pode observar no gráfico da Figura 74, o material que proporciona a menor redução dos consumos energéticos anuais de aquecimento para diâmetros do tubo enterrados entre os 0,20 e os 0,40 metros é o PVC (devido à sua menor condutibilidade térmica). Para este mesmo intervalo de diâmetros pode-se concluir que a diferença obtida entre os tubos de aço e de betão é

praticamente desprezável, embora o aço permita uma redução ligeiramente superior. Tendo em conta que a diferença entre os três materiais é minimizada com o aumento do diâmetro do tubo enterrado, sobretudo para diâmetros de tubo superiores a 0,80 metros, se considerarmos um tubo com diâmetro igual a 0,30 metros, então obtêm-se reduções de 865,95, 865,37 e 862,24 kWh/m<sup>2</sup>.ano para os tubos de aço, de betão e de PVC, respetivamente.

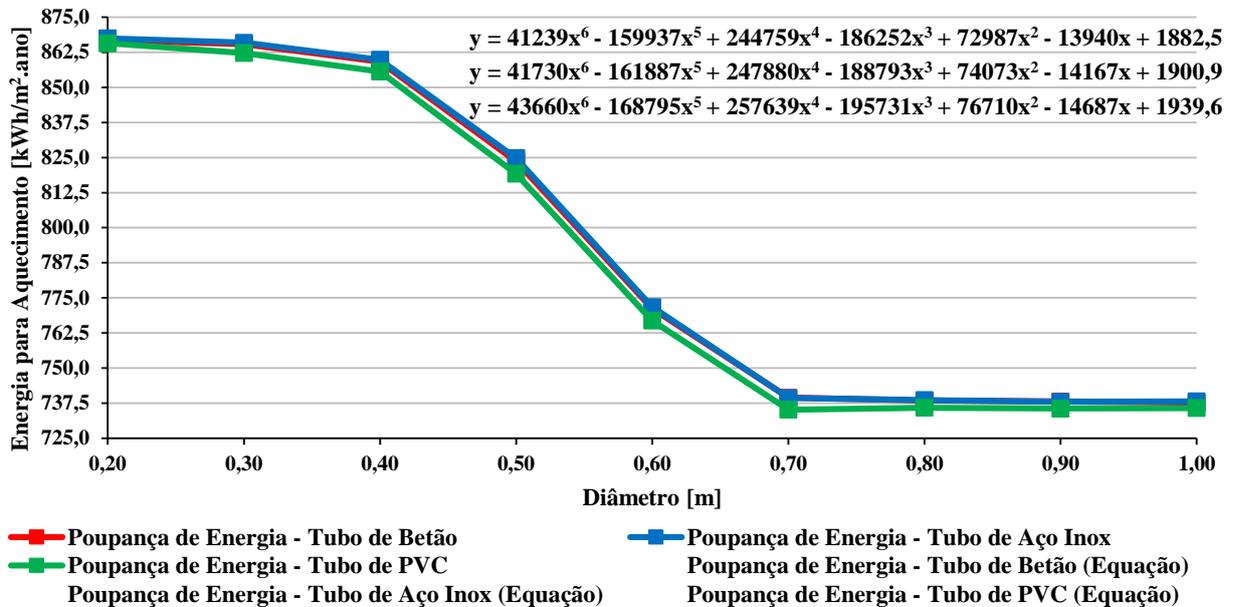


Figura 74 - Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para aquecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC

A Tabela 26 resume as poupanças de energia para aquecimento proporcionadas por cada tipo de tubo enterrado, de acordo com o diâmetro analisado. As poupanças de energia, apresentadas em percentagem, foram calculadas através da diferença de consumos energéticos entre o sistema de ventilação sem e com o sistema *EAHE*, para cada um dos diâmetros analisados e de acordo com os materiais considerados.

Tabela 26 - Poupança nos consumos energéticos para aquecimento em função do tipo de material e do diâmetro do tubo enterrado

Material	Poupança de Energia para Aquecimento (%)								
	Diâmetro do tubo enterrado [m]								
	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Betão	56	56	55	53	50	48	48	48	47
Aço Inox	56	56	55	53	50	48	48	48	48
PVC	56	56	55	53	49	47	47	47	47

No gráfico da Figura 75 são representadas as reduções dos consumos energéticos anuais de arrefecimento que cada material constituinte do tubo enterrado consegue proporcionar. Como se pode observar na figura abaixo, não existem diferenças significativas entre os vários materiais ao longo de toda a escala de diâmetros avaliados. À semelhança do que se verificou anteriormente, foram os diâmetros mais reduzidos que proporcionaram as reduções mais significativas nos consumos. Assim, considerando as reduções obtidas com a introdução de um tubo com 0,30 metros de diâmetro, verifica-se uma redução dos consumos energéticos de 84,08, 84,05 e 83,80 kWh/m<sup>2</sup>.ano para os tubos de aço inox, betão e PVC, respetivamente.

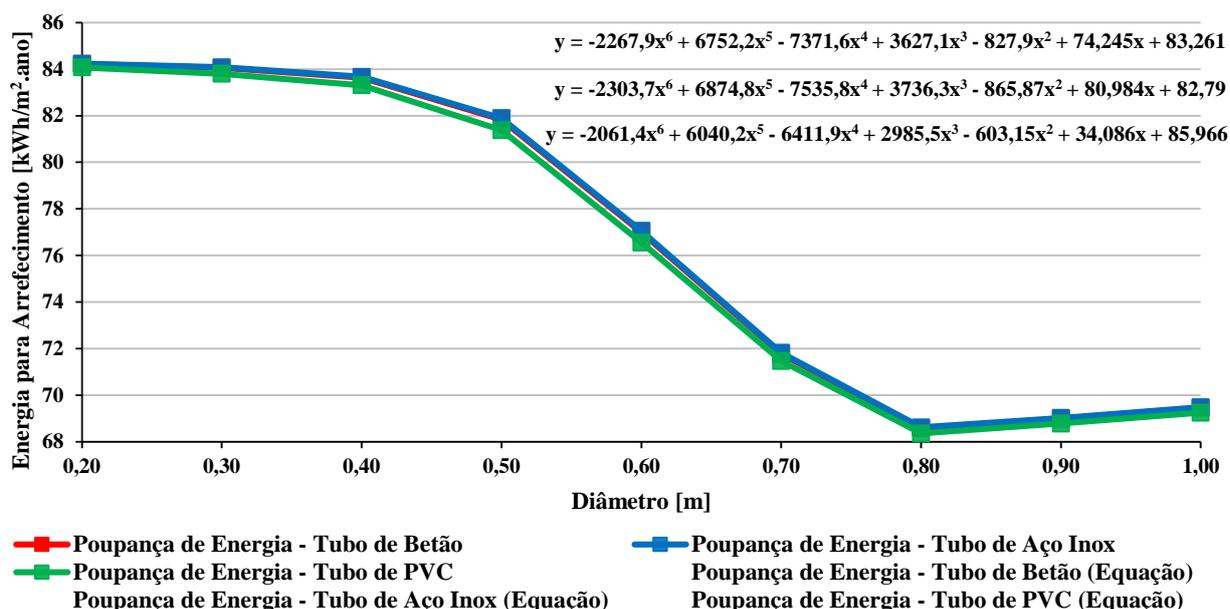


Figura 75 - Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para arrefecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC

Na Tabela 27 são apresentadas as poupanças de energia para arrefecimento proporcionadas por cada tipo de tubo enterrado e de acordo com o diâmetro analisado. As referidas poupanças são apresentadas em percentagem e calculadas através da diferença de consumos energéticos entre o sistema de ventilação sem e com o sistema *EAHE*, para cada um dos diâmetros analisados e de acordo com os materiais considerados.

Tabela 27 - Poupança nos consumos energéticos para arrefecimento em função do tipo de material e do diâmetro do tubo enterrado

<b>Poupança de Energia para Arrefecimento (%)</b>									
<b>Diâmetro do tubo enterrado [m]</b>									
<b>Material</b>	<b>0,20</b>	<b>0,30</b>	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>	<b>0,60</b>	<b>0,70</b>	<b>0,80</b>	<b>0,90</b>	<b>1,00</b>
<b>Betão</b>	12	12	12	12	11	10	10	10	10
<b>Aço Inox</b>	12	12	12	12	11	10	10	10	10
<b>PVC</b>	12	12	12	12	11	10	10	10	10

Como se pode comprovar nos resultados apresentados acima, a gama de diâmetros recomendada para a célula de teste com as características estudadas varia entre os 0,20 e os 0,40 metros. Os benefícios da opção de diâmetros contidos na gama indicada são mais evidentes na estação de aquecimento do que na de arrefecimento. Além disso, à medida que os diâmetros vão sendo aumentados, os benefícios no desempenho do sistema de ventilação vão sendo sucessivamente reduzidos.

#### **4.1.3. Variação da profundidade**

Os resultados relativos ao estudo da influência da variação da profundidade do tubo enterrado, foram obtidos assumindo valores fixos para o comprimento e o diâmetro do tubo. Assim, para cada gama de profundidades e materiais analisados, foram considerados um comprimento de 100 metros e um diâmetro de 0,30 metros.

##### **4.1.3.1. Tubo de Betão**

Como se pode observar no gráfico da Figura 76, o consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro diminui com a introdução do tubo enterrado no solo ao longo de todo o dia mais frio do ano, sendo esta redução de consumo mais evidente no decorrer da hora mais fria (verificada às 08:00). No decorrer desta hora o consumo de energia desce dos 1,72 kWh/m<sup>2</sup> para os 1,04, os 0,93 e os 0,92 kWh/m<sup>2</sup> quando é introduzido um tubo a 0,50, 4,00 e 7,00 metros de profundidade, respetivamente. Estas reduções, comparativamente à solução base, correspondem a diminuições do consumo de 39%, 46% e 47%, respetivamente para a ordem anterior. Por sua vez, no decorrer da hora mais quente do dia (que ocorre às 15:00), verifica-se também uma redução do consumo

de energia dos 0,35 kWh/m<sup>2</sup> para os 0,21, 0,13 e 0,12 kWh/m<sup>2</sup>, que correspondem a percentagens de 40%, 62% e 65% para as profundidades de 0,50, 4,00 e 7,00 metros.

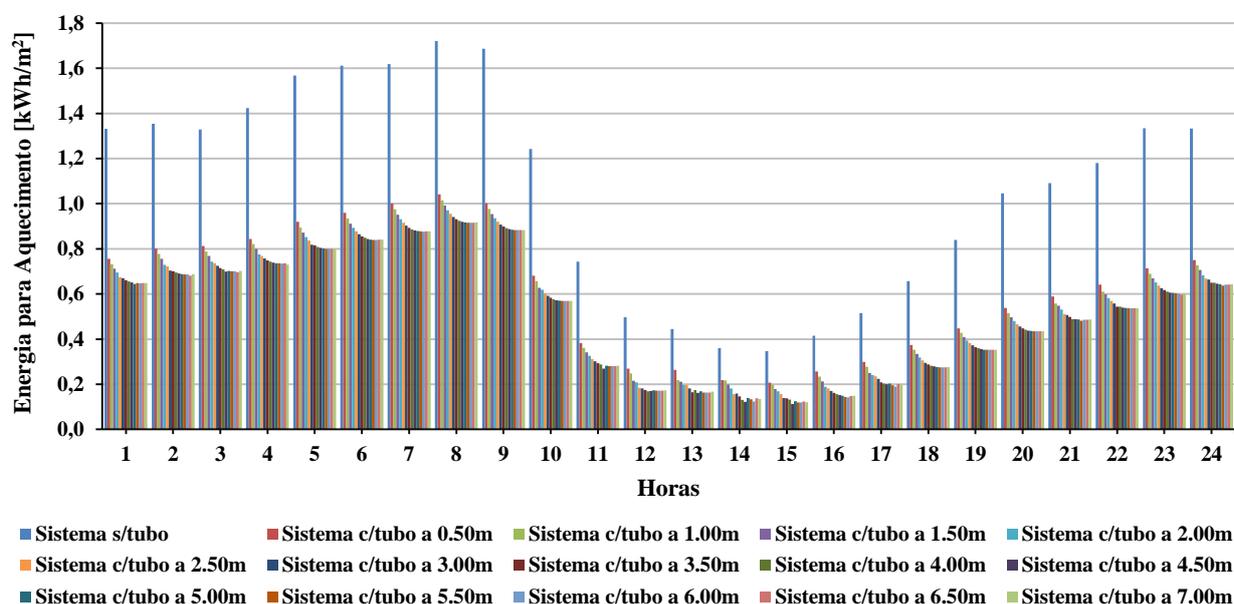


Figura 76 - Variação do consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, consoante a profundidade do tubo enterrado

A partir da análise do gráfico da Figura 77, no qual se expressa a diferença entre os consumos de energia para aquecimento do sistema de climatização da situação base e com o tubo enterrado no solo, pode-se concluir que a variação da profundidade do permutador de calor ar-solo apresenta uma influência aproximadamente logarítmica nos resultados. Os consumos energéticos de aquecimento diminuíram ao longo de todo o dia com a introdução dos tubos enterrados mas, como é possível observar no referido gráfico, para profundidades superiores a 4,00 metros as reduções são menos significativas do que as apresentadas até então. A 0,50, 4,00 e 7,00 metros de profundidade verificam-se reduções nos consumos de 10,89, 13,36 e 13,47 kWh/m<sup>2</sup>, que correspondem a valores entre 43% e 52% inferiores aos da situação base.

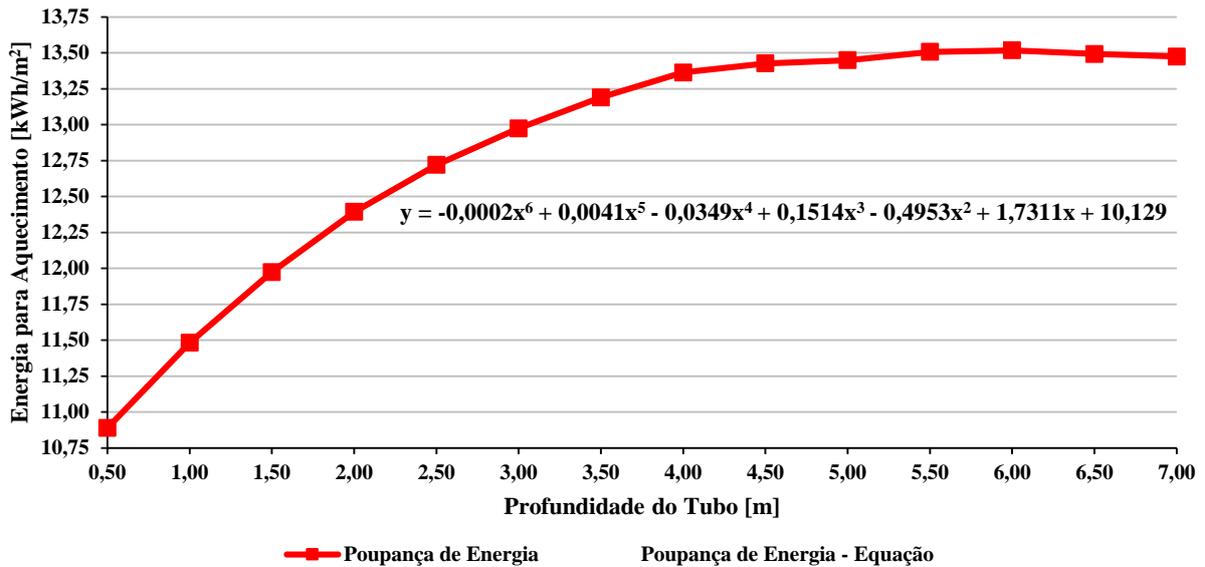


Figura 77 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação da profundidade do tubo

Relativamente à quantificação dos consumos energéticos de arrefecimento do dia 10 de Agosto (dia mais quente do ano) expressa no gráfico da Figura 78, verifica-se que estes também são reduzidos após a introdução do tubo enterrado no solo. Ao introduzir um de tubo às profundidades de 0,50, 4,00 e 7,00 metros, observa-se uma redução do consumo de energia para arrefecimento no decorrer da hora mais quente do dia (12:00) dos 0,93 kWh/m<sup>2</sup> para os 0,83, os 0,80 e os 0,79 kWh/m<sup>2</sup>, respetivamente. De uma forma similar, também no decorrer da hora mais fria do dia (verificada às 06:00) os consumos energéticos descem dos 0,03 kWh para os 0,02 e os 0,00 kWh/m<sup>2</sup> a profundidades de 0,50 e 4,00 e 7,00 metros. Estas reduções correspondem a reduções no consumo de energia de aproximadamente 11%, 14% e 15% para a hora mais quente e entre os 23% e os 100% durante a hora mais fria, para as profundidades acima referidas.

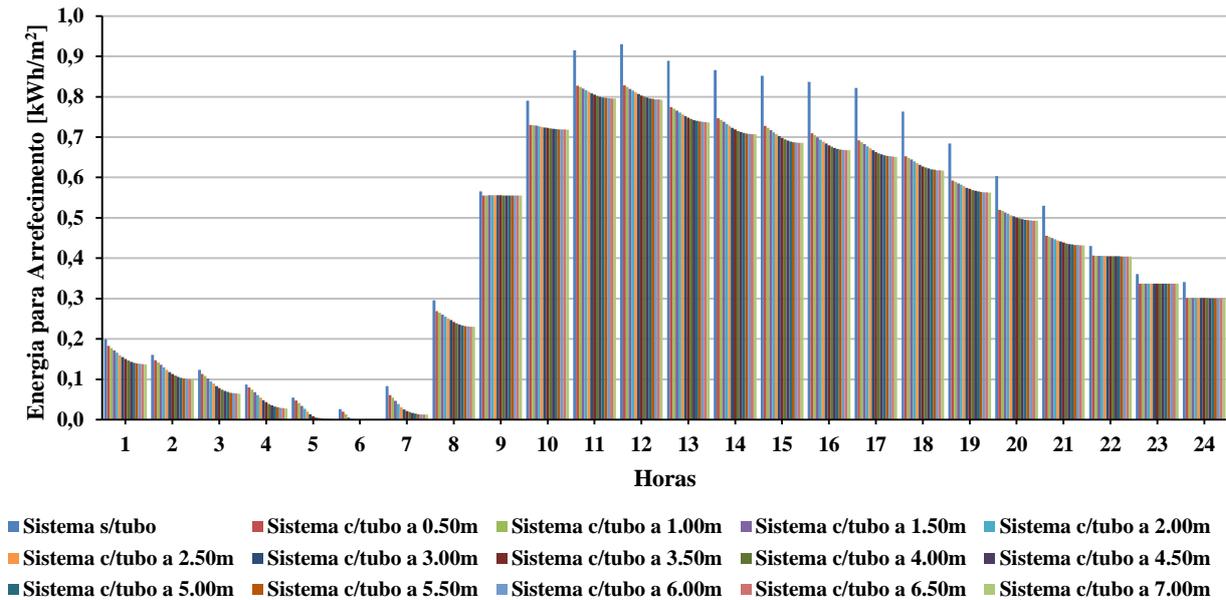


Figura 78 - Variação do consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, consoante a profundidade do tubo enterrado

No gráfico da Figura 79, é representada a diferença entre os consumos energéticos para arrefecimento da situação padrão e a com o tubo enterrado. Neste gráfico é possível observar que o aumento da profundidade do tubo para valores superiores a 4,00 metros introduz reduções dos consumos energéticos a um ritmo inferior em relação às profundidades anteriores. A introdução de um tubo enterrado às profundidades de 0,50, 4,00 e 7,00 metros proporciona reduções nos consumos energéticos de 1,43, 2,04 e 2,18 kWh/m<sup>2</sup>, respetivamente, o que corresponde a reduções percentuais na ordem dos 12%, 17% e 18%.

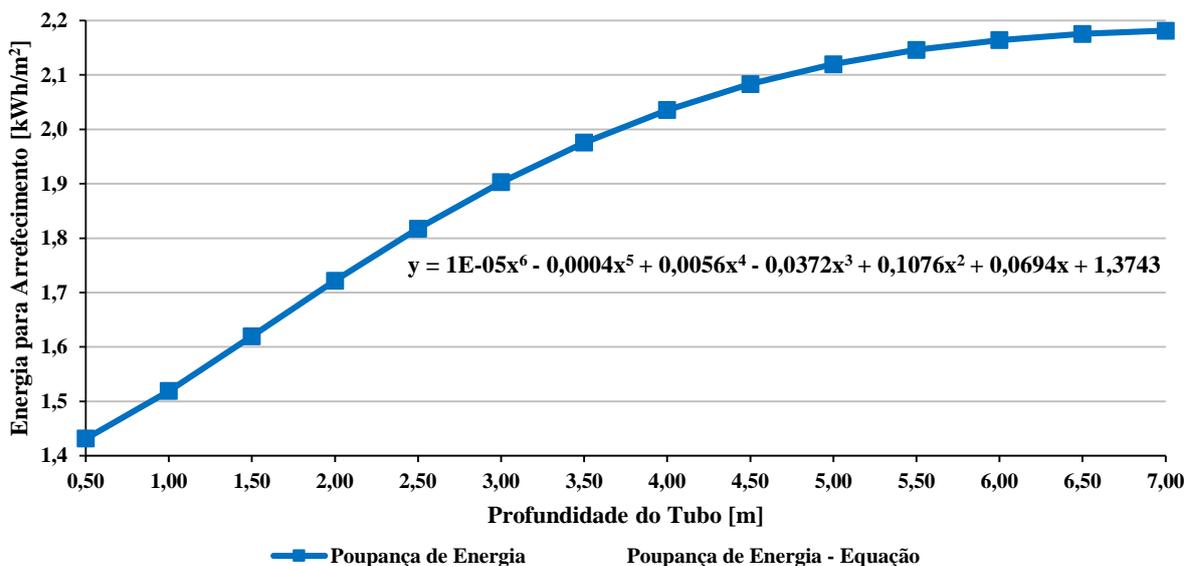


Figura 79 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação da profundidade do tubo

A variação mensal do consumo de energia para aquecimento, expressa no gráfico da Figura 80, demonstra a influência positiva da introdução do sistema de permutador de calor ar-solo no comportamento térmico da célula de teste. No caso de Janeiro, o mês mais frio do ano, o total do consumo energético para aquecimento desce dos 490,38 para os 253,19 kWh/m<sup>2</sup>.mês, nas situações referentes ao sistema de climatização da situação padrão e o com um tubo enterrado a 4,00 metros de profundidade, respetivamente, correspondendo a uma redução do consumo de aproximadamente 48%.

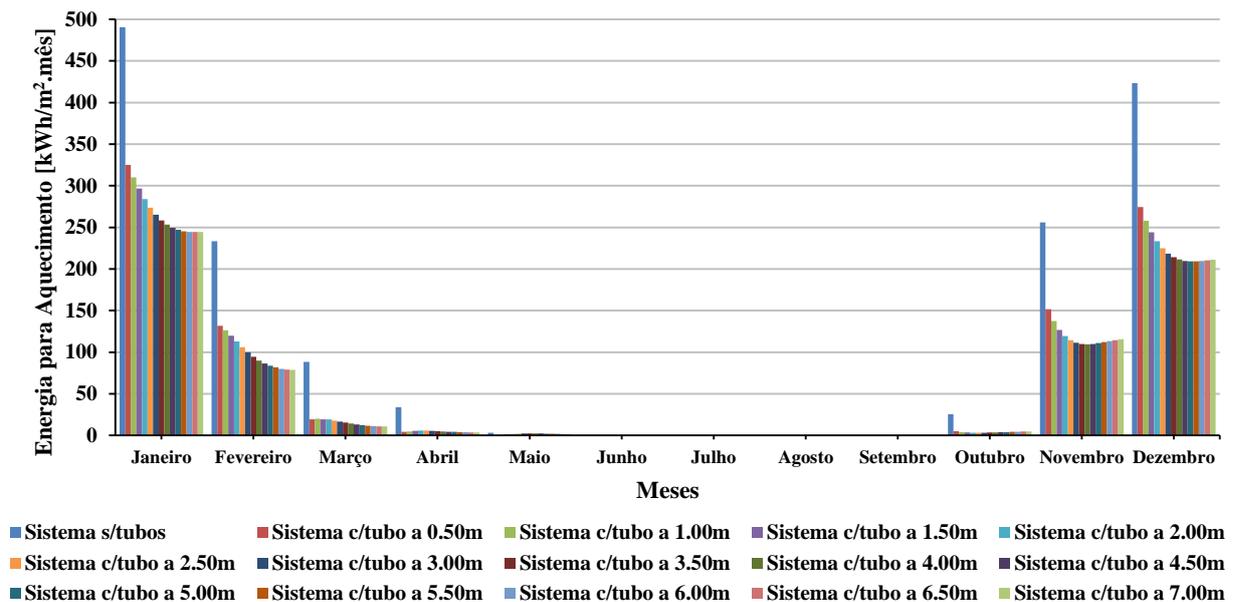


Figura 80 – Variação mensal dos consumos de energia para aquecimento consoante a profundidade do tubo enterrado

Como se pode observar no gráfico da Figura 81, a redução do consumo energético anual para aquecimento sofre um impulso substancial com a introdução de um tubo enterrado no solo que, no entanto, vai abrandando à medida que se aumenta a profundidade. A título de exemplo, as reduções do consumo impostas pela introdução do tubo enterrado variam entre os 643,36, os 865,37 e os 885,50 kWh/m<sup>2</sup>.ano para profundidades de 0,50, 4,00 e 6,00 metros, respetivamente. Estes valores correspondem a reduções percentuais de 41%, 56% e 57%.

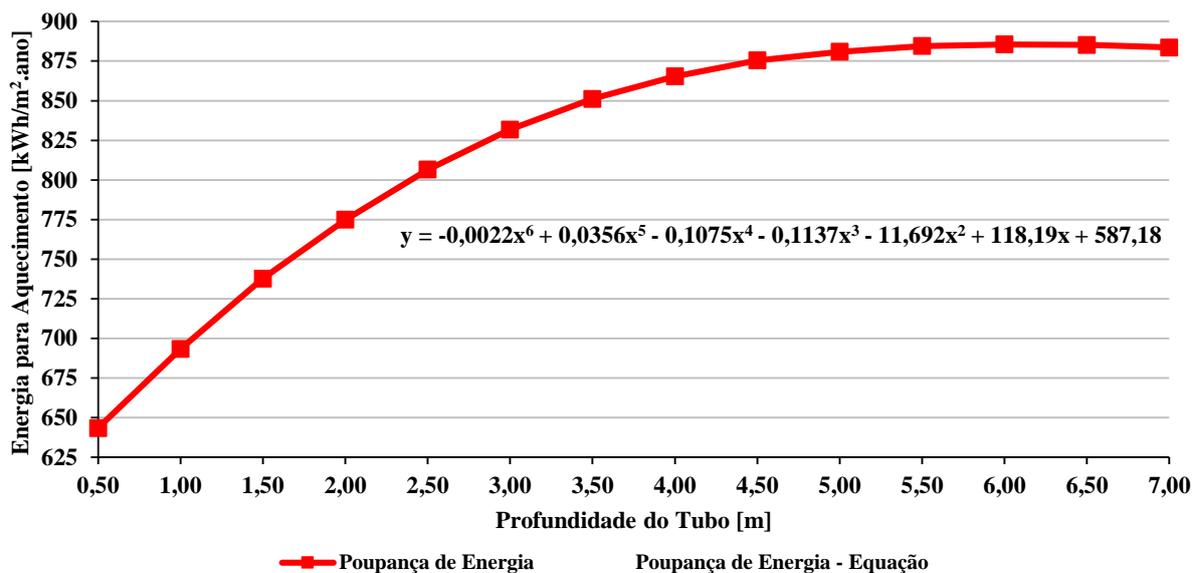


Figura 81 – Diferença de consumos energéticos anuais de aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo

A variação mensal dos consumos energéticos para o arrefecimento, expressa no gráfico da Figura 82, demonstra que o sistema de climatização da célula de teste com o tubo enterrado no solo apresenta uma redução significativa, comparativamente à situação base, exceto para a profundidade de 0,50 metros nos meses de Abril a Junho. Este fato pode dever-se devido à maior influência da temperatura do ar exterior e da radiação solar no solo, comparativamente com profundidades superiores, motivo pelo qual os consumos de energia para arrefecimento aumentam ligeiramente. No decorrer do mês de Julho, o mês mais quente de todo o ano, verifica-se a redução dos consumos energéticos de climatização dos 180,58 kWh/m<sup>2</sup>.mês do sistema sem o tubo enterrado, para os 178,26, os 149,79 e os 146,60 kWh/m<sup>2</sup>.mês do sistema de climatização com um tubo enterrado a 0,50, 4,00 e 7,00 metros, respetivamente. Estas reduções variam entre os valores de 1% e 19%, passando pelos 17% da profundidade intermédia. Além do mês mais quente, verifica-se também a redução dos consumos energéticos nas restantes ocasiões em que é necessário arrefecer o interior da célula de teste.

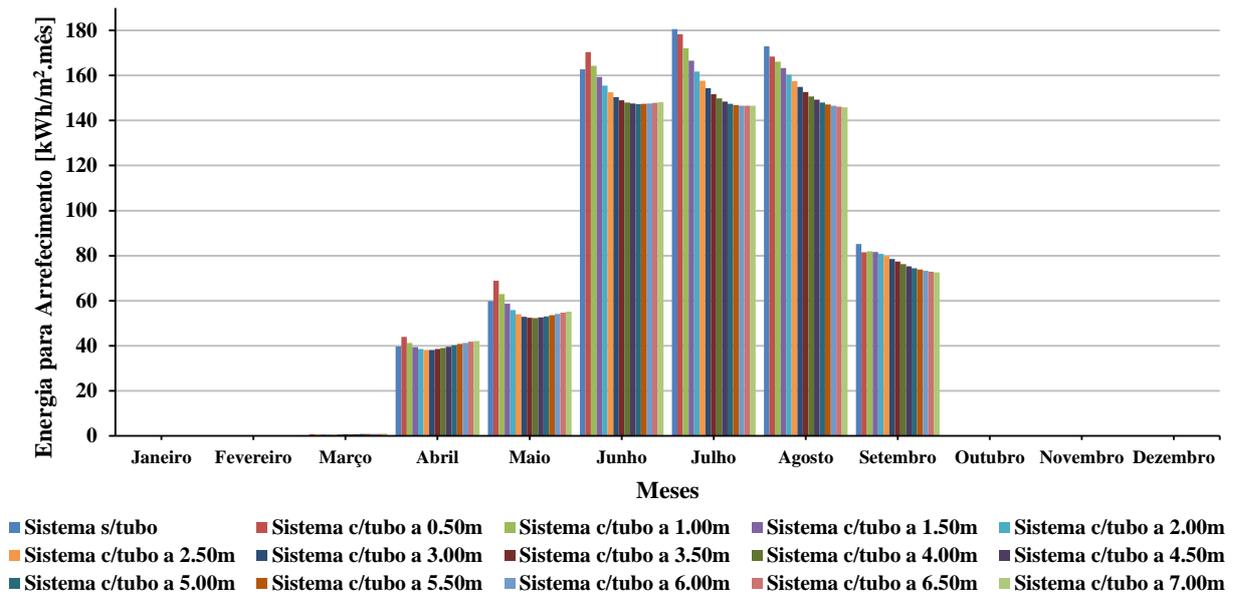


Figura 82 – Variação mensal dos consumos de energia para arrefecimento consoante a variação da profundidade do tubo enterrado

O gráfico da Figura 83 representa a diferença de consumos energéticos anuais de arrefecimento entre o sistema de climatização da situação base e o sistema com o permutador de calor ar-solo e pode-se comprovar o impacto positivo que a presença do tubo enterrado no solo tem no comportamento térmico do edifício. Embora o aumento da profundidade permita a redução dos consumos energéticos, especialmente para profundidades inferiores a 4,00 metros, a introdução de um tubo de betão enterrado a 0,50 metros implica um aumento dos consumos de 11,08 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Este valor vai diminuindo à medida que a profundidade se aproxima do primeiro metro de profundidade, valor no qual já se verifica uma redução do consumo de 11,67 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Este facto deve-se à enorme influência que a radiação solar ainda tem no solo a reduzida profundidade que, por não conseguir dissipar toda a energia calorífica recebida, faz com que o ar a circular no interior do tubo aqueça em vez de arrefecer. Para profundidades de 4,00 e 7,00 metros verificam-se reduções dos consumos energéticos para arrefecimento de 84,05 e 89,56 kWh/m<sup>2</sup>.ano, valores que correspondem a reduções de 12% e 13%, respetivamente.

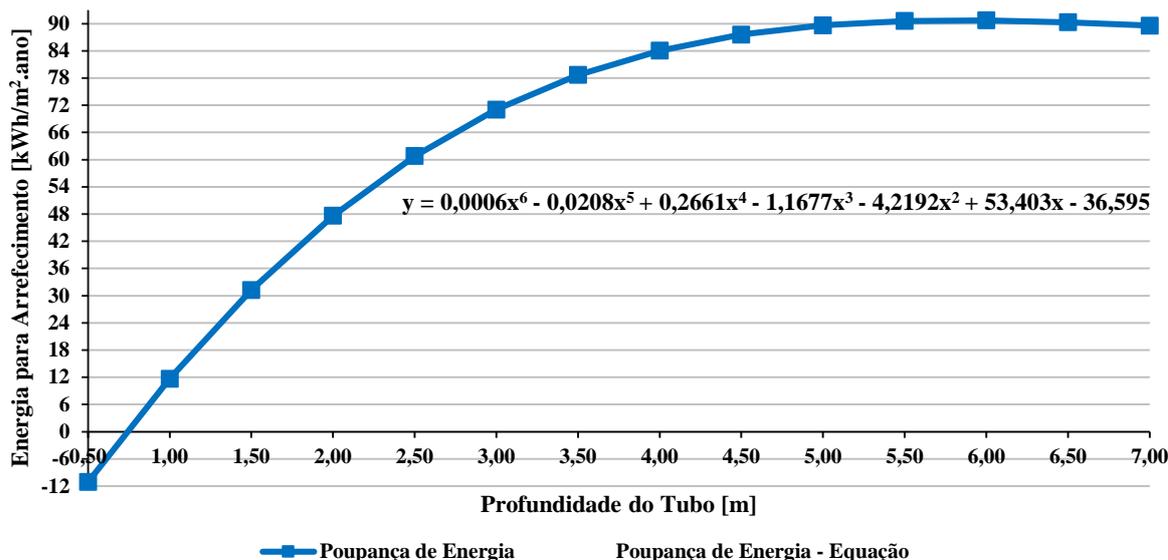


Figura 83 – Diferença de consumos energéticos anuais de arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo enterrado

#### 4.1.3.2. Tubo de Aço Inox

A partir da análise do gráfico da Figura 84, no qual se expressa a diferença entre os consumos de energia para aquecimento do sistema de climatização da situação base e o com o tubo de aço enterrado no solo, pode-se concluir que a introdução do permutador de calor ar-solo permite uma descida dos consumos energéticos do dia mais frio do ano. O aumento da profundidade do tubo enterrado proporciona uma redução mais acentuada até valores na ordem dos 4,00 metros, valor a partir do qual se verifica uma tendência de estabilização dos valores obtidos. Assim, as reduções dos consumos energéticos apresentam valores de 11,04, 13,33 e 13,48 kWh/m<sup>2</sup> que correspondem a percentagens de menos 43%, 52% e 53%, respetivamente.

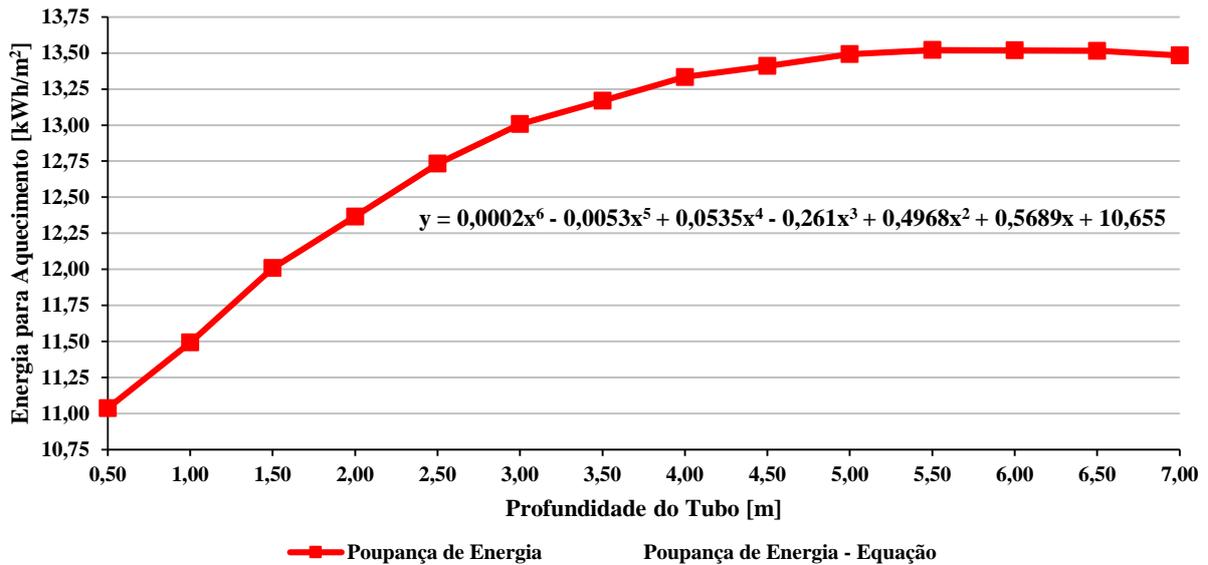


Figura 84 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 2 de Janeiro, consoante a variação da profundidade do tubo

O gráfico da Figura 85, o qual expressa a diferença entre os consumos energéticos de arrefecimento do sistema de climatização da situação base e do sistema com o tubo enterrado no solo para o dia 10 de Agosto, permite concluir que a introdução do tubo a profundidades superiores a 4,00 metros representa uma atenuação substancial da evolução dos resultados obtidos para profundidades inferiores. A introdução de um tubo enterrado no solo proporciona uma redução do consumo energético para arrefecimento que varia entre os 1,44, os 2,04 e os 2,18 kWh/m<sup>2</sup> para valores de profundidade de 0,50, 4,00 e 7,00 metros, que correspondem a reduções de 12%, 17% e 18%, respetivamente.

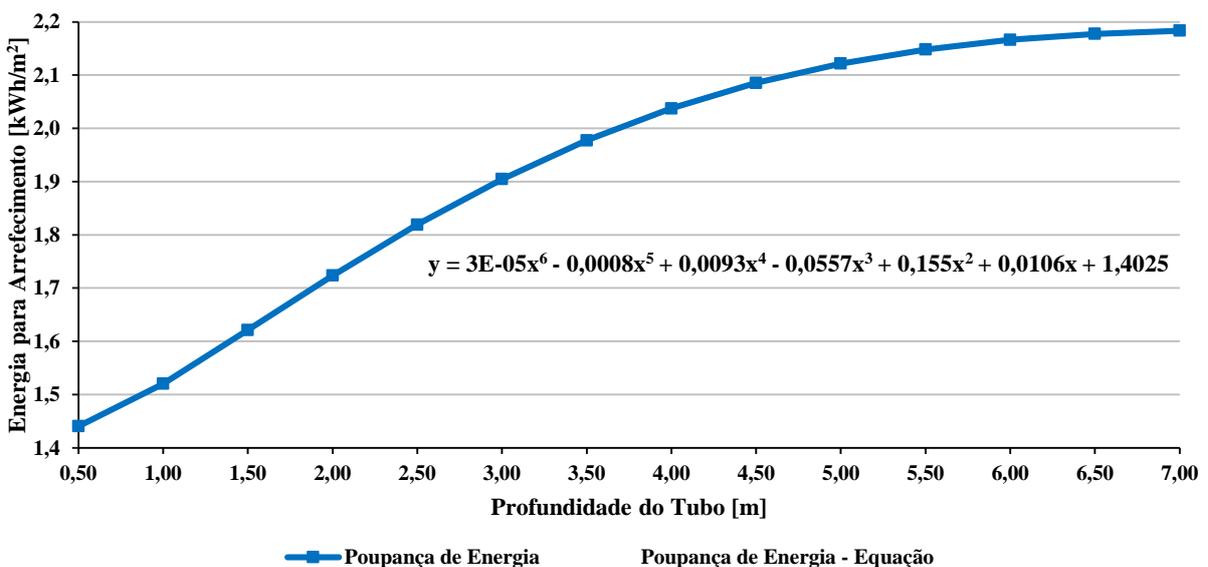


Figura 85 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação da profundidade do tubo

A diferença de consumo energético anual para aquecimento entre o sistema de climatização da situação base e o sistema com o permutador de calor ar-solo é representada no gráfico da Figura 86. A redução do consumo energético para aquecimento é bastante impulsionada após a introdução de um tubo enterrado em aço, principalmente para profundidades inferiores a 4,00 metros, sofrendo um ligeiro abrandamento para valores superiores. A título de exemplo, com a introdução de um tubo enterrado a 4,00 metros de profundidade, verifica-se uma redução total dos consumos anuais para aquecimento de 865,95 kWh/m<sup>2</sup>.ano, comparativamente com o sistema de climatização da situação sem o tubo enterrado, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 56%.

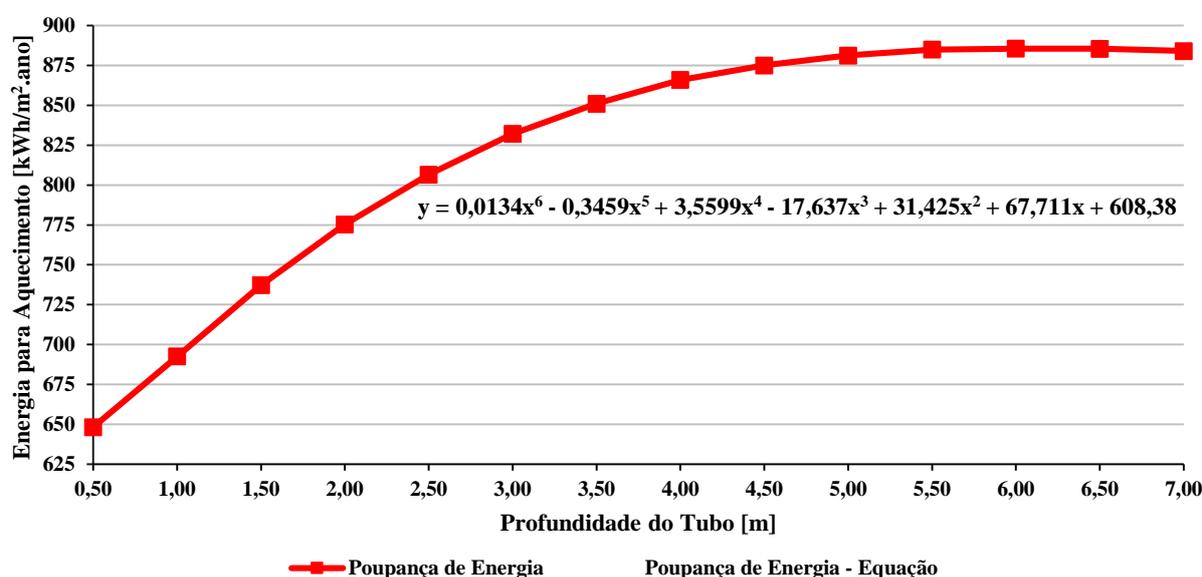


Figura 86 - Diferença de consumos energéticos anuais de aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo

Ao analisar o gráfico da Figura 87, no qual é apresentada a diferença anual dos consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de climatização da situação sem e com o sistema *EAHE*, pode-se observar a redução dos consumos resultante da introdução do tubo enterrado no solo. A diferença de consumos energéticos entre os dois sistemas apresenta valores menos significativos para profundidades acima dos 4,00 metros. Até este valor verifica-se uma redução mais significativa do consumo, nomeadamente se se considerar um tubo enterrado a 1,00 e a 4,00 metros, valores para os quais se verificam reduções anuais de 11,57 e 84,08 kWh/m<sup>2</sup>.ano que correspondem, respetivamente, a reduções percentuais de 2% e 12%. À semelhança do que aconteceu com o tubo de betão, também o tubo de aço enterrado a 0,50 metros de profundidade provoca um aumento de 8,82 kWh/m<sup>2</sup>.ano nos consumos energéticos, valor que se inverte até à profundidade de 1,00 metro.

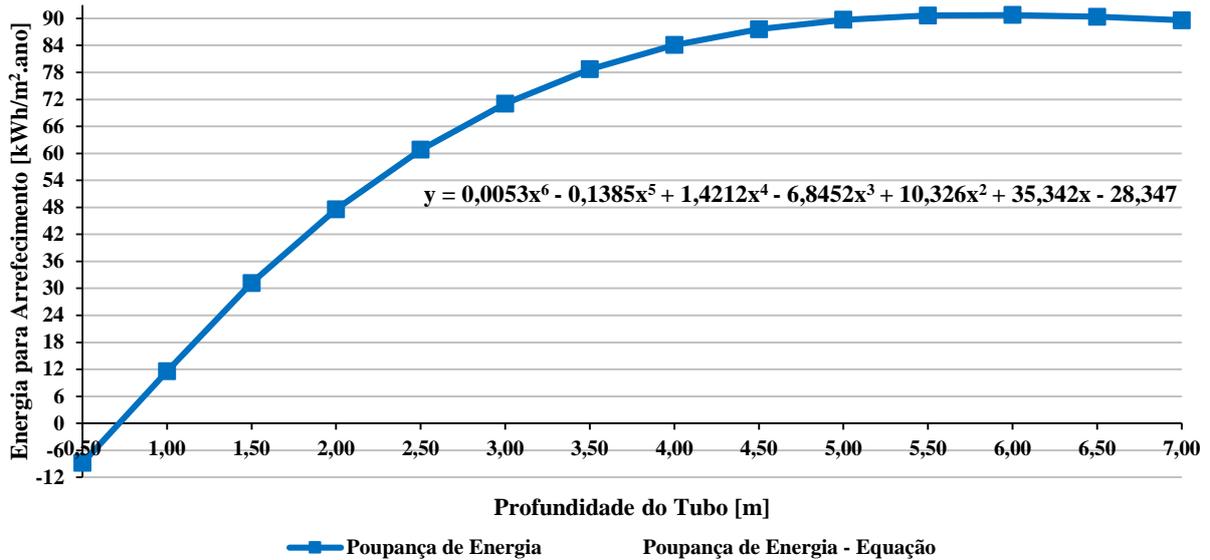


Figura 87 - Diferença de consumos energéticos anuais de arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo

#### 4.1.3.3. Tubo de PVC

No gráfico da Figura 88 é representada, para o dia 2 de Janeiro, a diferença entre os consumos energéticos de aquecimento dos sistemas de climatização sem e com o permutador de calor ar-solo. Pode-se concluir que a introdução de um tubo de PVC enterrado no solo proporciona reduções dos consumos energéticos, especialmente a profundidades inferiores a 4,00 metros, valor a partir do qual se verifica um abrandamento. As reduções dos consumos energéticos para aquecimento variam entre os 10,91, os 13,27 e os 13,43 kWh/m<sup>2</sup> para valores de profundidade de 0,50, 1,00 e 4,00 metros, que correspondem a reduções de 42% e 52%, respetivamente.

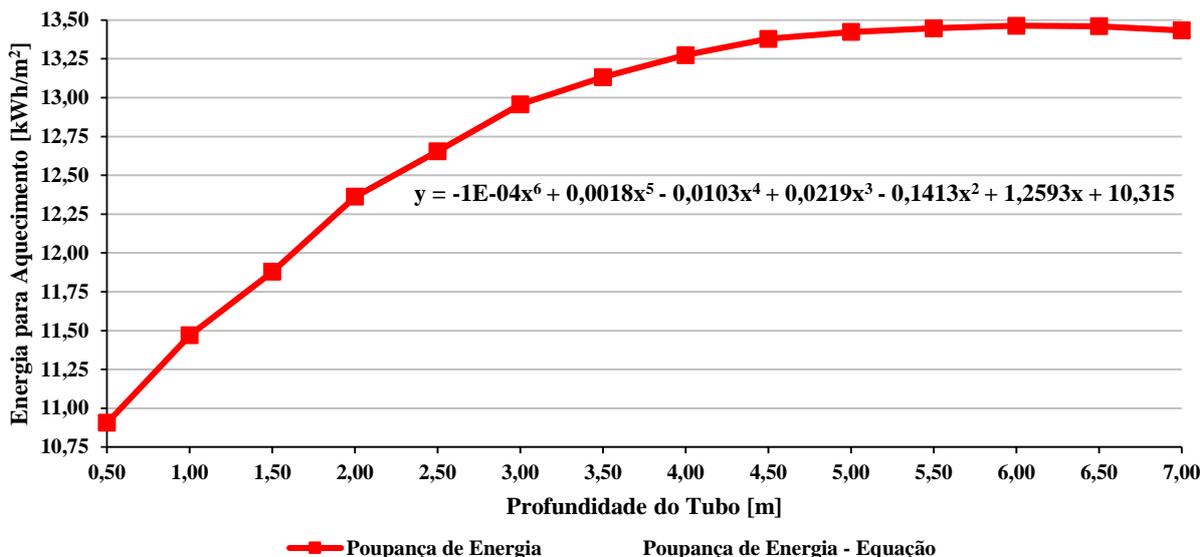


Figura 88 - Diferença de consumos energéticos para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com tubos enterrados no dia 2 de Janeiro, consoante a variação da profundidade do tubo

O gráfico da Figura 89 expressa a diferença entre os consumos energéticos para arrefecimento da situação base e da situação com permutador de calor ar-solo para o dia 10 de Agosto. No gráfico abaixo pode-se observar que o aumento da profundidade do tubo enterrado para valores superiores a 4,00 metros introduz reduções dos consumos energéticos menos significativas comparativamente a profundidades inferiores. Para valores entre os 0,50 e os 4,00 metros verificam-se reduções nos consumos de 1,42 e 2,02 kWh/m<sup>2</sup>, que correspondem a reduções percentuais entre os 12% e os 17%, respetivamente. Já um tubo enterrado a 7,00 metros permite uma redução de 2,160 kWh/m<sup>2</sup> (menos 18%) nos consumos.

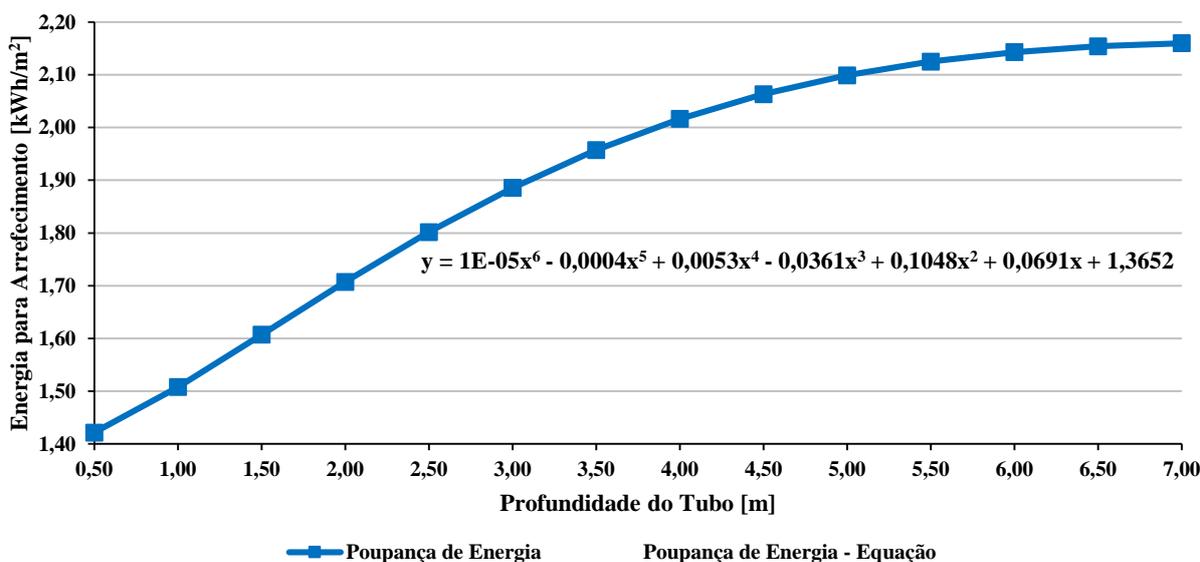


Figura 89 - Diferença de consumos energéticos para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado no dia 10 de Agosto, consoante a variação da profundidade do solo

A diferença de consumo energético anual para aquecimento entre os sistemas de climatização sem e com o sistema *EAHE* é representada no gráfico da Figura 90. A redução do consumo energético para aquecimento é bastante impulsionada após a introdução de um tubo de PVC enterrado a profundidades compreendidas entre os 0,50 e os 4,00 metros e sofre um abrandamento para profundidades acima deste valor. Com a introdução de um tubo enterrado a 0,50, 4,00 e 7,00 metros, verifica-se uma redução total dos consumos anuais para aquecimento de 641,38, 862,24 e 880,54 kWh/m<sup>2</sup>.ano comparativamente com o sistema de climatização da situação base, o que corresponde a reduções de aproximadamente 41%, 56% e 57% respetivamente.

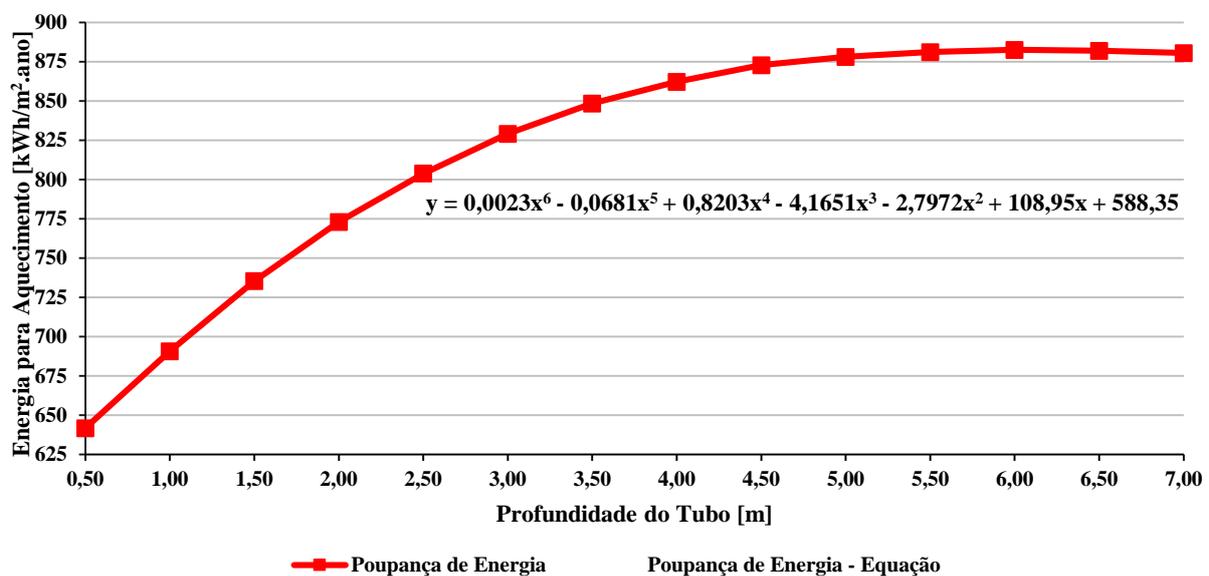


Figura 90 - Diferença de consumos energéticos anuais para aquecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo

Relativamente à diferença anual dos consumos energéticos para arrefecimento entre a situação base e a introdução do permutador de calor ar-solo, a sua representação é efetuada no gráfico da Figura 91. Neste pode observar-se que os consumos energéticos sofrem uma redução relativamente significativa com a introdução do tubo enterrado no solo, especialmente para profundidades entre os 1,00 e os 4,00 metros. Entre os valores referidos anteriormente verifica-se uma importante redução do consumo, nomeadamente se se considerar um tubo de PVC a profundidades de 1,00 e 4,00 metros, valores para os quais se verificam reduções anuais de 12,70 e 83,81 kWh/m<sup>2</sup>.ano que correspondem, respetivamente, a reduções percentuais de 2% e 12%. No que toca aos consumos energéticos do sistema com permutador de calor ar-solo enterrado a 0,50 metros, estes são negativos porque, à semelhança das razões já apontadas anteriormente, os

consumos aumentam ligeiramente devido à incapacidade de arrefecimento do solo numa profundidade tão reduzida.

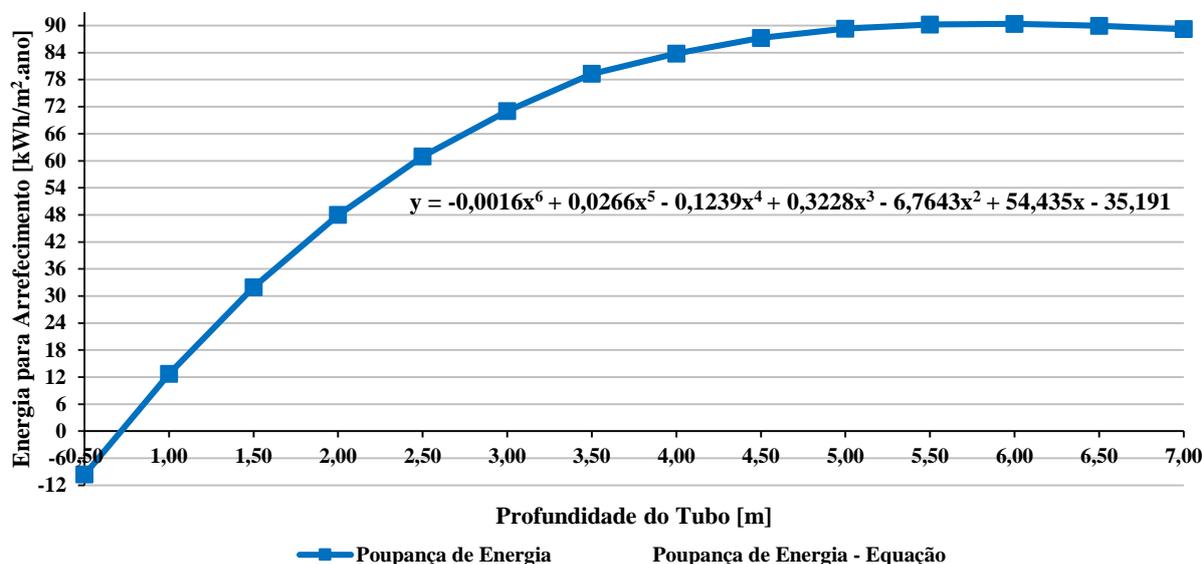


Figura 91 - Diferença de consumos energéticos anuais para arrefecimento entre o sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado, consoante a variação da profundidade do tubo enterrado

No capítulo Anexos são apresentados os gráficos das Figuras 118, 119, 120 e 121, os quais representam para a variação da profundidade do tubo de aço inox, respetivamente, o consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, o consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto e os consumos mensais de energia para aquecimento e arrefecimento. Por sua vez, nos gráficos das Figuras 122, 123, 124 e 125 são apresentados os resultados homólogos para a variação da profundidade do tubo de PVC.

#### 4.1.3.4. Comparação dos resultados obtidos com os diferentes tipos de tubos

Apresentados os resultados dos consumos energéticos correspondentes à variação da profundidade consoante o material constituinte do tubo enterrado no solo, expressos para os dias mais quente e mais frio e no decorrer de um ano completo, são apresentadas nos gráficos das Figuras 92 e 93, as comparações das reduções anuais dos consumos para aquecimento e arrefecimento consoante o tipo de material do tubo. As equações presentes nos referidos gráficos, referentes às poupanças de energia para cada tipo de material, são apresentadas por ordem descendente para o tubo de betão, de aço inox e de PVC, respetivamente.

Como se pode observar no gráfico da Figura 92, a variação da profundidade a que se encontra o tubo enterrado não faz variar muito o comportamento térmico do permutador de calor ar-solo

consoante o tipo de material utilizado verificando-se, por isso, uma certa linearidade nos resultados finais. Não obstante, existem pequenas variações dos resultados consoante o material escolhido. Tendo como base os resultados para uma profundidade de 4,00 metros, o material que facultava uma maior redução dos consumos energéticos para aquecimento é o aço, com um valor de 865,95 kWh/m<sup>2</sup>.ano, seguido do betão com 865,37 kWh/m<sup>2</sup>.ano e do PVC com 862,24 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Estas reduções correspondem a uma diminuição dos valores obtidos para a situação padrão de 56% e 55% que, como se pode comprovar, apresentam variações muito pequenas entre si. Na restante gama de valores estudados mantêm-se sempre pequenas variações entre os materiais e, geralmente, com o aço inox a ser responsável pela maior redução e o PVC pela menor, passando pelo betão.

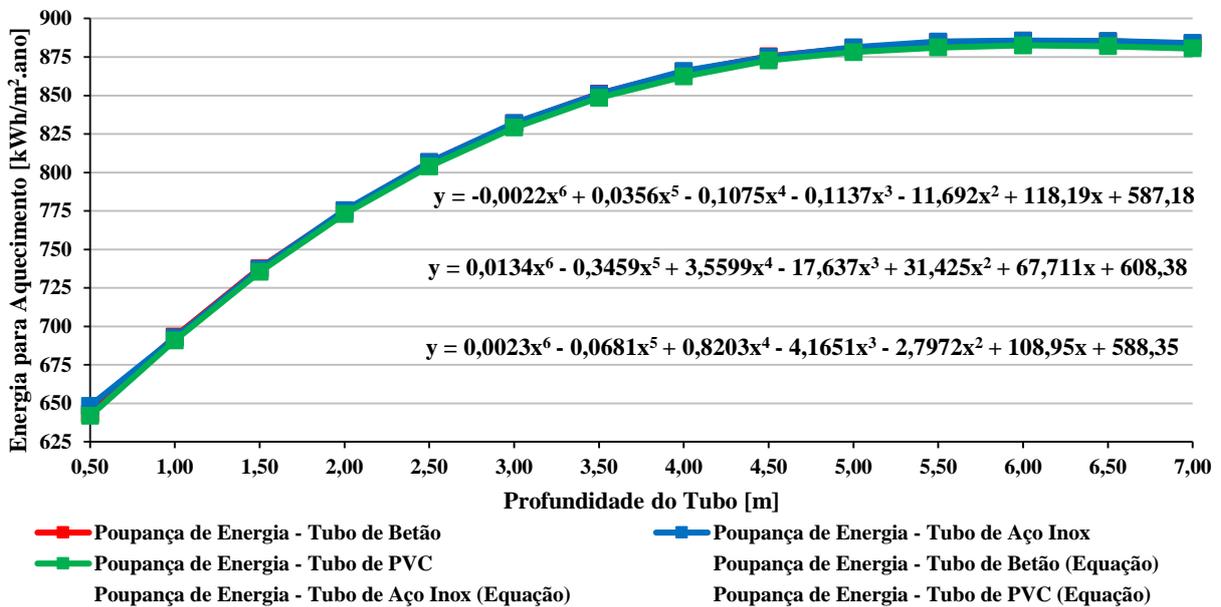


Figura 92 - Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para aquecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC

A Tabela 28, apresentada de seguida, resume as poupanças de energia para aquecimento proporcionadas por cada tipo de tubo enterrado, de acordo com a profundidade analisada. As poupanças de energia, apresentadas em percentagem, foram calculadas através da diferença de consumos energéticos entre o sistema de ventilação sem e com o sistema *EAHE*, para cada uma das profundidades analisadas e de acordo com os materiais considerados.

Tabela 28 - Poupança nos consumos energéticos para aquecimento em função do tipo de material e da profundidade do tubo enterrado

<b>Poupança de Energia para Aquecimento (%)</b>														
<b>Profundidade do tubo enterrado [m]</b>														
<b>Material</b>	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>	<b>4,0</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>	<b>5,5</b>	<b>6,0</b>	<b>6,5</b>	<b>7,0</b>
<b>Betão</b>	41	45	48	50	52	54	55	56	56	57	57	57	57	57
<b>Aço Inox</b>	42	45	47	50	52	54	55	56	56	57	57	57	57	57
<b>PVC</b>	41	44	47	50	52	53	55	56	56	57	57	57	57	57

No gráfico da Figura 93 são representadas as reduções dos consumos energéticos anuais de arrefecimento que os tubos de betão, aço inox e PVC considerados conseguem proporcionar. Como se pode observar na figura abaixo, não existem diferenças significativas entre os vários materiais ao longo de toda a escala de profundidades avaliadas, à semelhança do que se verificou anteriormente para os consumos de aquecimento. Existe, por isso uma grande linearidade nas reduções dos consumos, sendo por isso menos simples apontar aquele que apresenta o melhor comportamento térmico. Assim, considerando as reduções obtidas com a introdução de um tubo enterrado a 4,00 metros, verifica-se uma redução dos consumos energéticos de 84,08, 84,05 e 83,80 kWh/m<sup>2</sup>.ano para os tubos de aço, betão e PVC, que correspondem a reduções percentuais de 12% para os tubos de aço inox, betão e PVC.

É importante salientar que para todos os materiais estudados, os tubos enterrados a uma profundidade inferior a 1,00 metro produzem um ligeiro aumento dos consumos para arrefecimento. Para a profundidade de 0,50 metros, o tubo de aço produz um aumento dos consumos na ordem dos 8,82 kWh/m<sup>2</sup>.ano e os tubos de betão e PVC produzem aumentos de 11,08 e 9,63 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

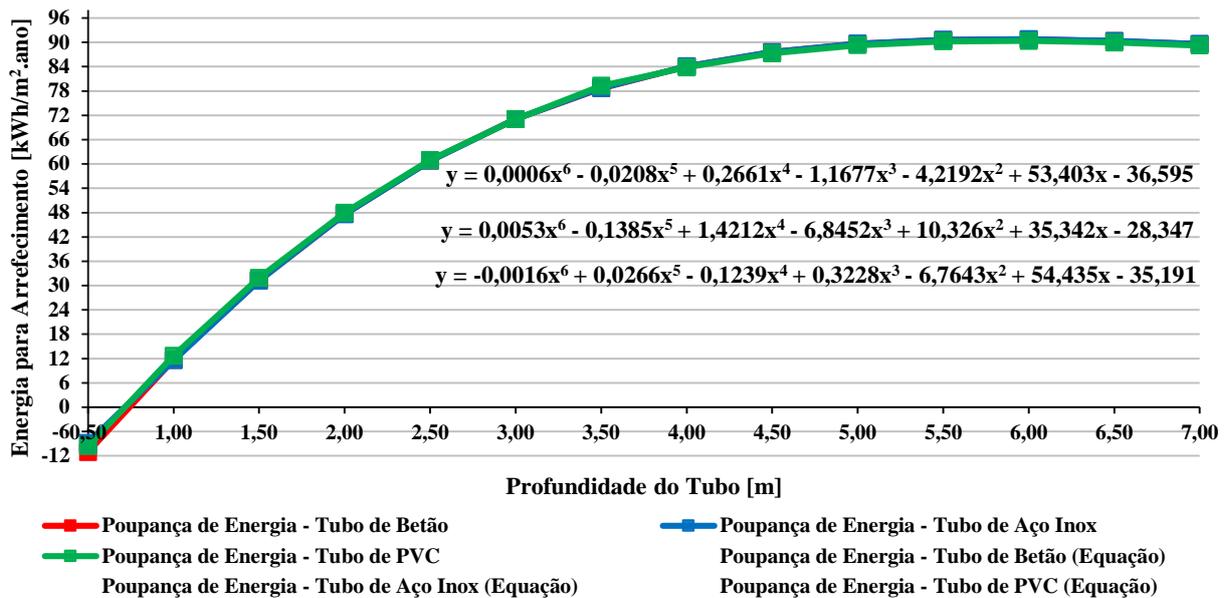


Figura 93 - Comparação das reduções de consumos energéticos anuais para arrefecimento proporcionadas pelos tubos de Betão, Aço Inox e PVC

Na Tabela 29 são apresentadas as poupanças de energia para arrefecimento proporcionadas por cada tipo de tubo enterrado e de acordo com a profundidade analisada. As referidas poupanças são apresentadas em percentagem e calculadas através da diferença de consumos energéticos entre o sistema de ventilação sem e com o sistema *EAHE*, para cada uma das profundidades analisadas e de acordo com os materiais considerados.

Tabela 29 - Poupança nos consumos energéticos para arrefecimento em função do tipo de material e da profundidade do tubo enterrado

Poupança de Energia para Arrefecimento (%)														
Profundidade do tubo enterrado [m]														
Material	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Betão	-2	2	5	7	9	10	11	12	13	13	13	13	13	13
Aço Inox	-1	2	4	7	9	10	11	12	13	13	13	13	13	13
PVC	-1	2	5	7	9	10	11	12	12	13	13	13	13	13

Analisando os resultados apresentados anteriormente, é possível indicar os valores de profundidade do tubo entre os 3,5 e os 4,5 metros como a gama recomendada a aplicar em situações idênticas à estudada. Ficou também comprovado que o aumento da profundidade não beneficia de forma relevante o desempenho do sistema de ventilação. Os valores de profundidade

inferiores a 1,0 metro são também desaconselháveis, visto que agravam os consumos energéticos do sistema de ventilação.

#### 4.2. Resultados do caso de estudo - *Wee Building*

Os resultados apresentados para o caso de estudo (*Wee Building*) foram obtidos tendo em conta a metodologia e considerações previamente apresentadas. Assim, o sistema *EAHE* foi dimensionado com um tubo de 135 metros de comprimento e um diâmetro de 0,20 metros, enterrado a 4,0 metros de profundidade. O material selecionado foi o PVC, com uma condutividade térmica de 0,17 W/m-K. Pode-se assumir que os resultados de aplicação dos conhecimentos adquiridos no caso de estudo estão divididos em quatro partes distintas, cada uma delas correspondente a uma localização diferente. As localizações consideradas foram as apresentadas na Tabela 30.

Tabela 30 - Localizações adotadas para aplicação do caso de estudo

<b>Localizações consideradas para o caso de estudo</b>			
Bragança	Évora	Lisboa	Porto

Para cada uma das localizações serão apresentados os valores dos consumos energéticos mensais e anuais do sistema de ventilação sem e com o tubo enterrado. Assim, à semelhança do que foi efetuado no estudo paramétrico, irão estabelecer-se comparações diretas entre os consumos energéticos para avaliar os benefícios da incorporação do sistema de permutador de calor ar-solo no sistema de ventilação. Os valores apresentados com a designação “solução base” correspondem aos do sistema de ventilação sem o sistema *EAHE*, enquanto os valores com a designação “solução híbrida” referem-se aos do sistema de ventilação com o sistema *EAHE*. Por último, serão também apresentadas as percentagens de energia poupada para aquecimento e arrefecimento obtidas com a introdução do sistema de permutador de calor ar-solo sob a designação “poupança atingida”.

#### 4.2.1. Resultados das simulações energéticas para Bragança

Como se pode observar no gráfico da Figura 94, a introdução do permutador de calor ar-solo permitiu uma redução significativa dos consumos de energia, especialmente na estação de aquecimento. Os valores dos consumos anuais de energia para aquecimento e arrefecimento da solução base são, respetivamente, 5457,51 e 739,40 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Comparativamente com a solução base, a solução com o permutador de calor ar-solo permitiu a redução do consumo anual de energia para aquecimento para os 2120,31 kWh/m<sup>2</sup>.ano e de energia para arrefecimento para os 539,18 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Pode-se então concluir que a introdução do permutador de calor ar-solo permitiu uma poupança anual de 3537,42 kWh/m<sup>2</sup>.ano em energia para climatização.

Os meses de Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro foram os meses em que se verificou a maior redução do consumo de energia. Por outro lado, nos meses da estação de arrefecimento verificou-se uma redução dos consumos energéticos mais linear.

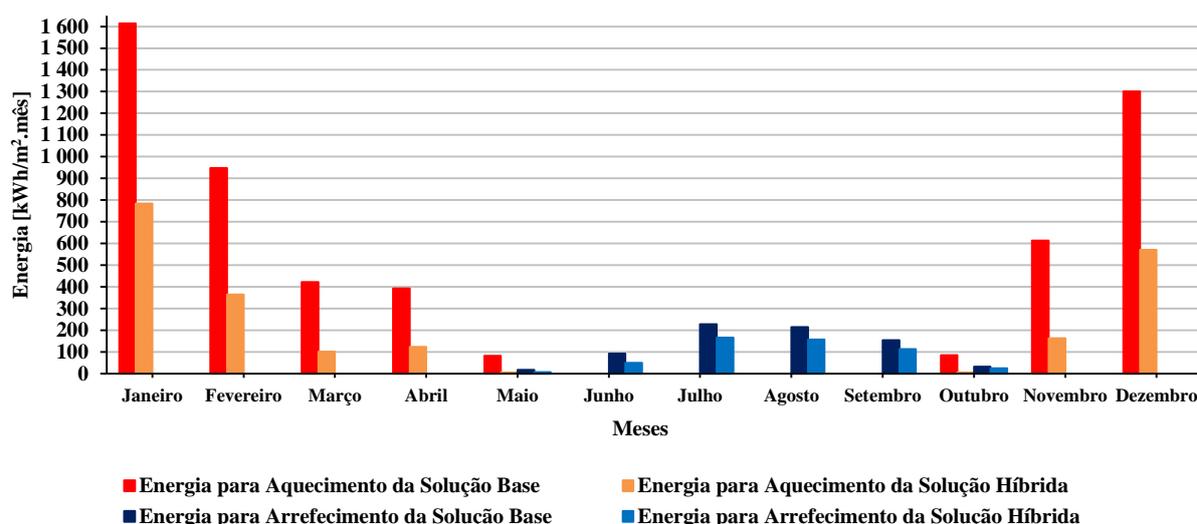


Figura 94 - Consumos de energia das soluções base e híbrida do *Wee Building* na cidade de Bragança

Os resultados das poupanças de energia atingidas, através das diversas simulações energéticas a que o *Wee Building* foi submetido para a cidade de Bragança, são apresentados na Tabela 31. Nesta tabela são indicados os valores de energia poupada mensalmente com a introdução do sistema *EAHE* e o valor “Total” consiste no valor médio de poupança anual.

Tabela 31 – Poupanças de energia atingidas para a cidade de Bragança

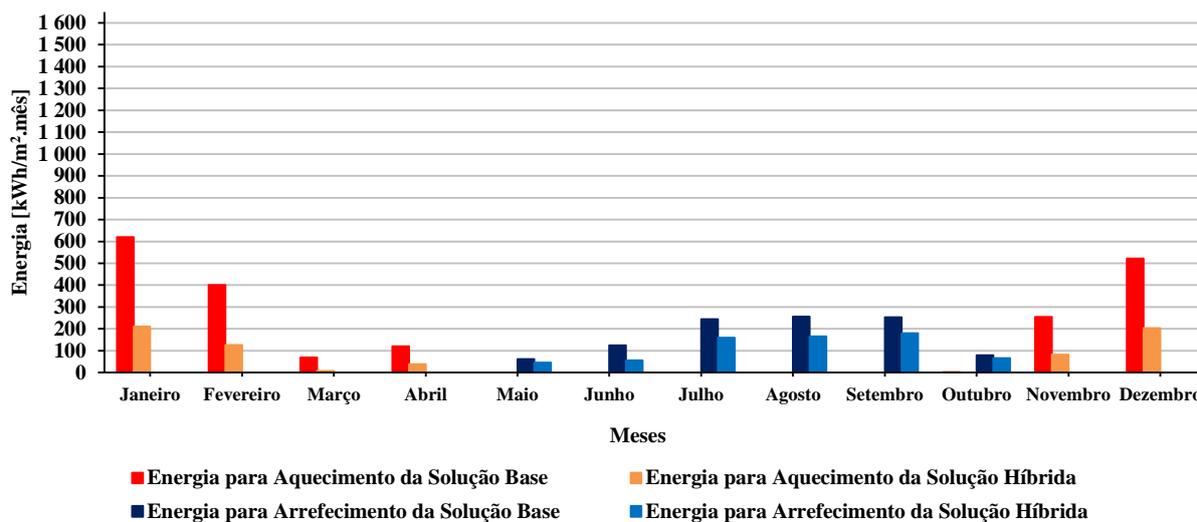
Meses	Poupança de Energia para Aquecimento Atingida [%]	Poupança de Energia para Arrefecimento Atingida [%]
<b>Janeiro</b>	51,4	0,0
<b>Fevereiro</b>	61,5	0,0
<b>Março</b>	75,8	0,0
<b>Abril</b>	68,6	0,0
<b>Mai</b>	93,2	53,9
<b>Junho</b>	0,0	46,3
<b>Julho</b>	0,0	27,5
<b>Agosto</b>	0,0	26,7
<b>Setembro</b>	0,0	26,5
<b>Outubro</b>	93,8	22,7
<b>Novembro</b>	73,3	0,0
<b>Dezembro</b>	56,1	0,0
<b>Total</b>	<b>71,7</b>	<b>33,9</b>

A partir da análise da Tabela 31 é possível concluir que a introdução do sistema de permutador de calor ar-solo permitiu uma poupança média de aproximadamente 72% no consumo anual de energia para aquecimento e de aproximadamente 34% no consumo anual de energia para arrefecimento. As poupanças de energia são inferiores nos meses em que a temperatura do ar exterior é mais desfavorável, tendência que se inverte nos meses com temperaturas mais amenas.

#### 4.2.2. Resultados das simulações energéticas para Évora

No gráfico da Figura 95 são apresentados os resultados dos consumos energéticos do *Wee Building* localizado em Évora. Nesse gráfico é possível constatar uma significativa redução dos consumos energéticos não só ao longo de todo o ano, como em especial no decorrer da estação de aquecimento. Os consumos anuais de energia para a solução base são de 1987,76 e 1017,93 kWh/m<sup>2</sup>.ano, respetivamente para aquecimento e arrefecimento. Pela mesma ordem, os consumos de energia da solução híbrida são de 667,33 e 672,05 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Pode-se então concluir que com a introdução do sistema *EAHE* foi possível poupar 1666,31 kWh/m<sup>2</sup>.ano em energia.

Por último, é ainda possível observar que as maiores poupanças de energia ocorreram nos meses de Janeiro, Fevereiro e Dezembro.


 Figura 95 - Consumos de energia das soluções base e híbrida do *Wee Building* na cidade de Évora

Os resultados das poupanças de energia obtidos nas várias simulações energéticas para a cidade de Évora, a que o *Wee Building* foi submetido, são apresentados na Tabela 32. São apresentados os valores mensais das poupanças de energia, bem como as poupanças médias anuais de energia para aquecimento e arrefecimento (indicadas sob a designação “Total”).

Tabela 32 – Poupanças de energia atingidas para a cidade de Évora

Meses	Poupança de Energia para Aquecimento Atingida [%]	Poupança de Energia para Arrefecimento Atingida [%]
Janeiro	66,1	0,0
Fevereiro	68,7	0,0
Março	88,1	0,0
Abril	68,3	0,0
Maio	0,0	26,5
Junho	0,0	55,2
Julho	0,0	34,9
Agosto	0,0	35,1
Setembro	0,0	28,8
Outubro	100,0	16,5
Novembro	67,7	0,0
Dezembro	61,1	0,0
<b>Total</b>	<b>74,3</b>	<b>32,8</b>

Como se pode observar na Tabela 32, a introdução de um sistema *EAHE* permitiu uma poupança média anual de 74% no consumo de energia para aquecimento e uma poupança de 33% no consumo de energia para arrefecimento.

#### 4.2.3. Resultados das simulações energéticas para Lisboa

Os resultados dos consumos energéticos do *Wee Building* localizado em Lisboa são apresentados no gráfico da Figura 96. Neste gráfico pode-se comprovar que a introdução de um permutador de calor ar-solo no sistema de ventilação permitiu uma redução dos consumos energéticos ao longo de todo o ano, especialmente nos meses da estação de aquecimento. Os consumos de energia para aquecimento da solução base foram reduzidos dos 1210,95 kWh/m<sup>2</sup>.ano para os 331,19 kWh/m<sup>2</sup>.ano da solução híbrida. Relativamente aos consumos de energia para arrefecimento, estes sofreram uma redução dos 979,39 kWh/m<sup>2</sup>.ano da solução base para os 611,29 kWh/m<sup>2</sup>.ano da solução híbrida. Pode-se então concluir que, para a localização de Lisboa, a introdução do permutador de calor ar-solo permitiu uma redução de 1247,86 kWh/m<sup>2</sup>.ano nos consumos anuais de energia para ventilação.

Por último, é ainda possível observar que as maiores poupanças de energia ocorreram nos meses de Janeiro, Fevereiro, Agosto e Dezembro.

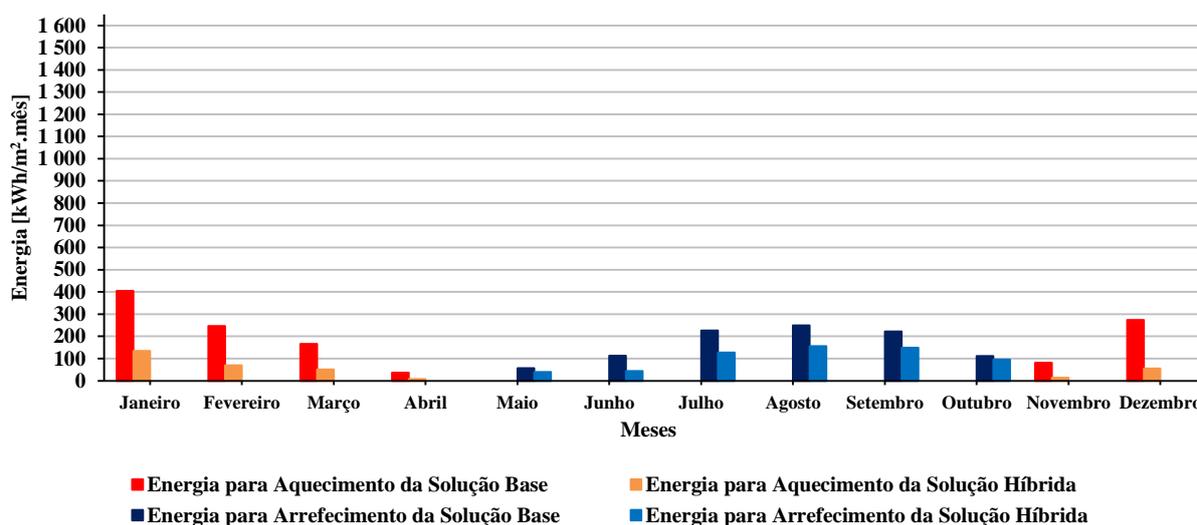


Figura 96 - Consumos de energia das soluções base e híbrida do *Wee Building* na cidade de Lisboa

Os resultados das poupanças de energia atingidas, através das diversas simulações energéticas a que o *Wee Building* foi submetido para a cidade de Lisboa, são apresentados na Tabela 33. Nesta tabela são indicados os valores de energia poupada mensalmente com a introdução do sistema *EAHE* e o valor “Total” consiste no valor médio de poupança anual.

Tabela 33 – Poupanças de energia atingidas para a cidade de Lisboa

Meses	Poupança de Energia para Aquecimento Atingida [%]	Poupança de Energia para Arrefecimento Atingida [%]
Janeiro	66,9	0,0
Fevereiro	71,7	0,0
Março	69,6	0,0
Abril	78,1	0,0
Mai	0,0	30,7
Junho	0,0	60,5
Julho	0,0	43,9
Agosto	0,0	37,6
Setembro	0,0	33,3
Outubro	0,0	13,9
Novembro	83,8	0,0
Dezembro	79,8	0,0
<b>Total</b>	<b>75,0</b>	<b>36,6</b>

A partir da análise da Tabela 33 é possível concluir que a introdução do sistema de permutador de calor ar-solo permitiu uma poupança média de aproximadamente 75% no consumo anual de energia para aquecimento e de aproximadamente 37% no consumo anual de energia para arrefecimento. As poupanças de energia são inferiores nos meses em que a temperatura do ar exterior é mais desfavorável, tendência que se inverte nos meses com temperaturas mais amenas.

#### 4.2.4. Resultados das simulações energéticas para o Porto

No gráfico da Figura 97 são apresentados os resultados dos consumos energéticos do *Wee Building* localizado no Porto. Nesse gráfico é possível constatar uma significativa redução dos consumos energéticos não só ao longo de todo o ano, como em especial no decorrer da estação de aquecimento. Os consumos anuais de energia para a solução base são de 2366,33 e 638,50 kWh/m<sup>2</sup>.ano, respetivamente para aquecimento e arrefecimento. Pela mesma ordem, os consumos de energia da solução híbrida são de 800,70 e 461,13 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Pode-se então concluir que com a introdução do sistema *EAHE* foi possível poupar 1742,99 kWh/m<sup>2</sup>.ano em energia para ventilação.

Por último, é ainda possível observar que as maiores poupanças de energia ocorreram nos meses de Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro.

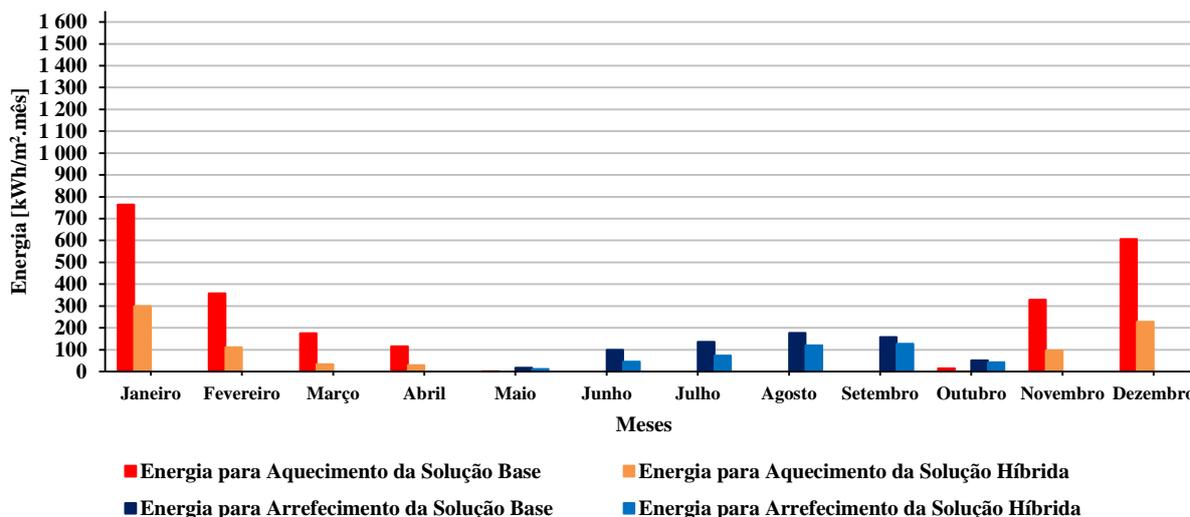


Figura 97 - Consumos de energia das soluções base e híbrida do *Wee Building* na cidade do Porto

Os resultados das poupanças de energia obtidos nas várias simulações energéticas para a cidade do Porto, a que o *Wee Building* foi submetido, são apresentados na Tabela 34. São apresentados os valores mensais das poupanças de energia, bem como as poupanças médias anuais de energia para aquecimento e arrefecimento (indicadas sob a designação “Total”).

Tabela 34 – Poupanças de energia atingidas para a cidade do Porto

Meses	Poupança de Energia para Aquecimento Atingida [%]	Poupança de Energia para Arrefecimento Atingida [%]
<b>Janeiro</b>	60,7	0,0
<b>Fevereiro</b>	68,8	0,0
<b>Março</b>	80,8	0,0
<b>Abril</b>	75,1	0,0
<b>Mai</b>	100,0	34,2
<b>Junho</b>	0,0	54,1
<b>Julho</b>	0,0	46,5
<b>Agosto</b>	0,0	31,8
<b>Setembro</b>	0,0	19,3
<b>Outubro</b>	92,1	17,0
<b>Novembro</b>	70,8	0,0
<b>Dezembro</b>	62,3	0,0
<b>Total</b>	<b>76,3</b>	<b>33,8</b>

Como se pode observar na Tabela 34, a introdução de um sistema *EAHE* permitiu uma poupança média anual de 76% no consumo de energia para aquecimento e uma poupança de 34% no consumo de energia para arrefecimento.

Apresentados os resultados individuais para cada uma das localizações escolhidas para o caso de estudo, pode-se concluir que as maiores poupanças de energia para aquecimento verificaram-se nos climas mais amenos (Porto e Lisboa) comparativamente ao clima com temperaturas do ar exterior mais baixas (Bragança). Relativamente às poupanças de energia para arrefecimento, verificaram-se melhores resultados em Lisboa, localização com as temperaturas do ar exterior mais elevadas.

### **4.3. Resultados da análise económica**

#### **4.3.1. Resultados da análise de custos de ciclo de vida**

Começando pela determinação da quantidade de tubo enterrado necessária, foi contabilizado o comprimento do tubo enterrado no solo, desde a admissão de ar exterior até ao coletor vertical que procederá à distribuição do fluxo de ar no interior do edifício. Os custos das tubagens que realizam a ligação entre o referido coletor e as zonas térmicas do edifício não foram contabilizados neste trabalho. Como se pode observar na Tabela 17, apresentada anteriormente, o sistema *EAHE* proposto para o *Wee Building* utiliza um total de 135 metros de tubo enterrado horizontalmente. No entanto, o valor que será utilizado para a contabilização dos custos será 140 metros, visto que serão considerados quatro tubos com comprimento unitário de 35 metros cada.

Na Tabela 35 são apresentados os custos orçamentais associados à instalação do sistema de permutador de calor ar-solo considerado de acordo com a bibliografia disponível. Na referida tabela são apresentadas as quantidades de cada elemento a instalar, expressas em m<sup>3</sup> no caso do volume de escavação das valas e nas respetivas unidades para os restantes elementos indicados. O preço unitário, apresentado para cada elemento descrito, corresponde ao preço de aquisição de cada unidade ou a escavação de um m<sup>3</sup> de solo.

Tabela 35 – Custos orçamentais da instalação do sistema *EAHE*

	Quantidade	Descrição	Preço unitário [€]	Preço total [€]
<b>Sistema EAHE</b>	4,0 [un]	Tubo geotérmico em PVC com 35 metros de comprimento e 0,20 metros de diâmetro	46,46	185,84
	1,0 [un]	Ventilador helicocentrífugo	264,33	264,33
	1,0 [un]	Admissão de ar exterior de aço galvanizado com ligação para conduta de 0,20 metros de diâmetro, filtro de ar e grelha de proteção	552,00	552,00
	1,0 [un]	Regulador de caudal de ar	55,96	55,96
	[h/homem]	Mão-de-Obra	67,69	254,28
	[%]	Meios auxiliares	3376,38	67,52
	[%]	Custos indiretos	3443,91	103,32
<b>Volume de Escavação</b>	270 [m <sup>3</sup> ]	Retroescavadora sobre pneus de 70 kW	5,14	1387,80
	[h/homem]	Mão-de-Obra	15,82	240,30
	[%]	Meios auxiliares	6,03	32,40
	[%]	Custos indiretos	6,15	48,60
			<b>Total</b>	<b>3192,35</b>

Como se pode observar na Tabela 35, apresentada acima, o custo total estimado da instalação do sistema de tubos enterrados no solo, dimensionado de acordo com as considerações anteriormente apresentadas, é de 3192,35€.

#### 4.3.2. Resultados da análise económica

Tendo por base o valor presente de venda ao público de eletricidade de 0,1528€/kWh e o índice de inflação de 1,5%, ambos indicados anteriormente, então foi realizada a seguinte estimativa da evolução do preço da eletricidade para os próximos 60 anos - apresentada na Tabela 36.

Tabela 36 - Estimativa da evolução dos preços da eletricidade em 60 anos

Período [anos]	Valor da Inflação	Fator de Correção $f_i$	Preço Corrigido [€]	Período [anos]	Valor da Inflação	Fator de Correção $f_i$	Preço Corrigido [€]
0	0	0	0,152800	31	0,015	1,586526	0,242421
1	0,015	1,015000	0,155092	32	0,015	1,610324	0,246058
2	0,015	1,030225	0,157418	33	0,015	1,634479	0,249748
3	0,015	1,045678	0,159780	34	0,015	1,658996	0,253495
4	0,015	1,061364	0,162176	35	0,015	1,683881	0,257297
5	0,015	1,077284	0,164609	36	0,015	1,709140	0,261157
6	0,015	1,093443	0,167078	37	0,015	1,734777	0,265074
7	0,015	1,109845	0,169584	38	0,015	1,760798	0,269050
8	0,015	1,126493	0,172128	39	0,015	1,787210	0,273086
9	0,015	1,143390	0,174710	40	0,015	1,814018	0,277182
10	0,015	1,160541	0,177331	41	0,015	1,841229	0,281340
11	0,015	1,177949	0,179991	42	0,015	1,868847	0,285560
12	0,015	1,195618	0,182690	43	0,015	1,896880	0,289843
13	0,015	1,213552	0,185431	44	0,015	1,925333	0,294191
14	0,015	1,231756	0,188212	45	0,015	1,954213	0,298604
15	0,015	1,250232	0,191035	46	0,015	1,983526	0,303083
16	0,015	1,268986	0,193901	47	0,015	2,013279	0,307629
17	0,015	1,288020	0,196810	48	0,015	2,043478	0,312243
18	0,015	1,307341	0,199762	49	0,015	2,074130	0,316927
19	0,015	1,326951	0,202758	50	0,015	2,105242	0,321681
20	0,015	1,346855	0,205799	51	0,015	2,136821	0,326506
21	0,015	1,367058	0,208886	52	0,015	2,168873	0,331404
22	0,015	1,387564	0,212020	53	0,015	2,201406	0,336375
23	0,015	1,408377	0,215200	54	0,015	2,234428	0,341421
24	0,015	1,429503	0,218428	55	0,015	2,267944	0,346542
25	0,015	1,450945	0,221704	56	0,015	2,301963	0,351740
26	0,015	1,472710	0,225030	57	0,015	2,336493	0,357016
27	0,015	1,494800	0,228405	58	0,015	2,371540	0,362371
28	0,015	1,517222	0,231832	59	0,015	2,407113	0,367807
29	0,015	1,539981	0,235309	60	0,015	2,443220	0,373324
30	0,015	1,563080	0,238839				

Foi a partir da estimativa dos valores do preço de venda ao público da eletricidade apresentados na tabela acima que se efetuaram os cálculos para a determinação do tempo de retorno do investimento no sistema *EAHE* dimensionado para o *Wee Building*.

#### 4.3.2.1. Tempo de retorno do investimento no sistema - Bragança

Na Tabela 37 são apresentados os valores totais anuais dos consumos energéticos de aquecimento (Energia para Aquecimento), de arrefecimento (Energia para Arrefecimento) e do ventilador do tubo enterrado (Energia para Ventilação) para ambas as situações base e híbrida. No caso da solução base, não se considera a ação do ventilador do tubo enterrado, visto que este não está em funcionamento. Além disso, é também apresentado o valor anual dos consumos de energia para aquecimento, arrefecimento e ventilação (Total Anual) e a poupança atingida com a introdução do sistema *EAHE* expressos em kWh/m<sup>2</sup>.ano.

Tabela 37 – Contabilização dos custos energéticos anuais para a cidade de Bragança

Custos Energéticos Anuais					
Situação	Energia para Aquecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Energia para Arrefecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Energia para Ventilação [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Total Anual [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Poupança Atingida [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
Base	5 457,51	739,40	0,00	6 196,91	
Híbrida	2 120,31	539,18	118,64	2 778,130	<b>3 418,78</b>

Como se pode observar na tabela acima, a introdução do sistema *EAHE* permitiu uma poupança de 3418,78 kWh/m<sup>2</sup>.ano nos consumos energéticos de ventilação do edifício. Ao converter esta poupança num *cash-flow* expresso em euros e subtraí-lo gradualmente ao valor inicial do investimento no equipamento, considerando o efeito inflacionário, então obtemos o seguinte retorno do investimento no sistema (cumulativo nominal) ao longo dos vários períodos apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Tempo de retorno do investimento no equipamento em Bragança

Período [anos]	Cash-flow [€]	Cumulativo Nominal [€]
0	-3192,35	-3192,35
1	530,23	-2662,12
2	538,18	-2123,95
3	546,25	-1577,69
4	554,45	-1023,25
5	562,76	-460,49
6	571,20	110,72
7	579,77	690,49
8	588,47	1278,96

Segundo a tabela acima, o período de amortização do permutador de calor ar-solo instalado na cidade de Bragança é de aproximadamente 5 anos e 10 meses, visto que no início do sexto ano de funcionamento já existe um lucro de 110,72€ a recuperar pelo dono do edifício. No gráfico da Figura 98 é apresentada a linha de retorno do investimento para a referida localização.

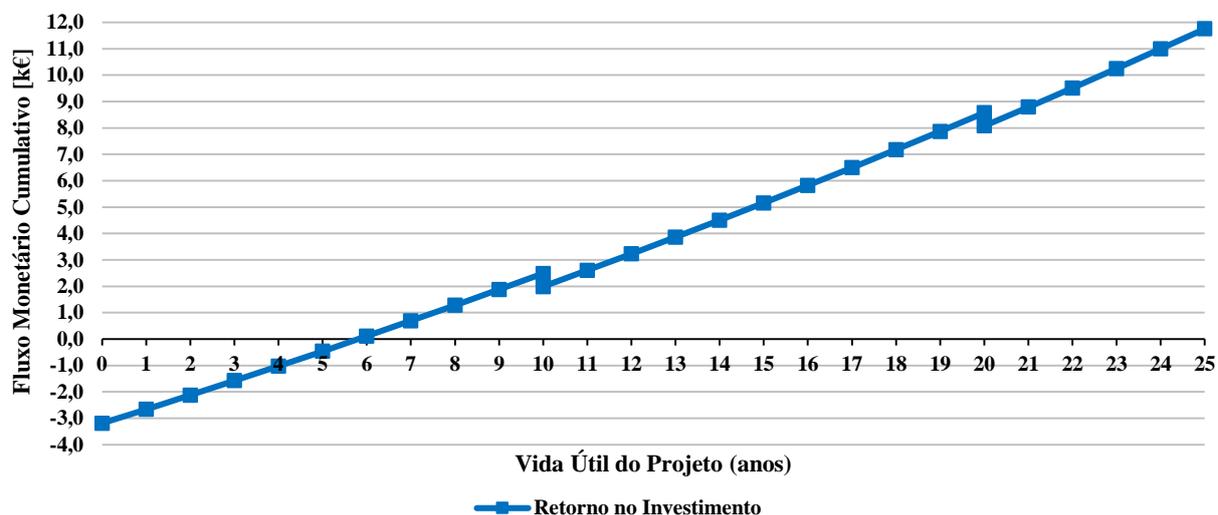


Figura 98 – Linha de retorno do investimento no equipamento instalado em Bragança

#### 4.3.2.2. Tempo de retorno do investimento no sistema - Évora

Na Tabela 39 são contabilizados os custos energéticos anuais para a cidade de Évora das situações base e híbrida descritas anteriormente.

Tabela 39 – Contabilização dos custos energéticos anuais para a cidade de Évora

Custos Energéticos Anuais					
Situação	Energia para Aquecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Energia para Arrefecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Energia para Ventilação [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Total Anual [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Poupança Atingida [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
Base	1 987,76	1 017,93	0,00	3 005,69	
Híbrida	667,33	672,05	134,77	1 474,15	<b>1 531,54</b>

Como se pode verificar na tabela acima, a introdução do sistema *EAHE* permitiu uma poupança de 1531,54 kWh/m<sup>2</sup>.ano nos consumos energéticos de ventilação do edifício. Convertendo esta poupança num *cash-flow* expresso em euros e subtraindo gradualmente ao valor inicial do investimento no equipamento, considerando o efeito inflacionário, então obtemos o seguinte retorno do investimento no sistema (cumulativo nominal) ao longo dos vários períodos apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 – Tempo de retorno do investimento no equipamento em Évora

Período [anos]	Cash-flow [€]	Cumulativo Nominal [€]	Período [anos]	Cash-flow [€]	Cumulativo Nominal [€]
0	-3192,35	-3192,35	9	267,58	-921,73
1	237,53	-2954,82	10	271,59	-1146,75
2	241,09	-2713,73	11	275,66	-871,08
3	244,71	-2469,02	12	279,80	-591,29
4	248,38	-2220,64	13	283,99	-307,29
5	252,11	-1968,53	14	288,25	-19,04
6	255,89	-1712,65	15	292,58	273,54
7	259,73	-1452,92	16	296,97	570,51
8	263,62	-1189,30			

Como é possível concluir a partir da Tabela 40, o período de amortização do sistema *EAHE* instalado na cidade de Évora é de aproximadamente 14 anos e 1 mês, visto que no início do décimo quinto ano de funcionamento já existe um lucro de 273,54€. A linha de retorno do investimento no equipamento para a cidade de Évora é apresentada de seguida no gráfico da Figura 99.

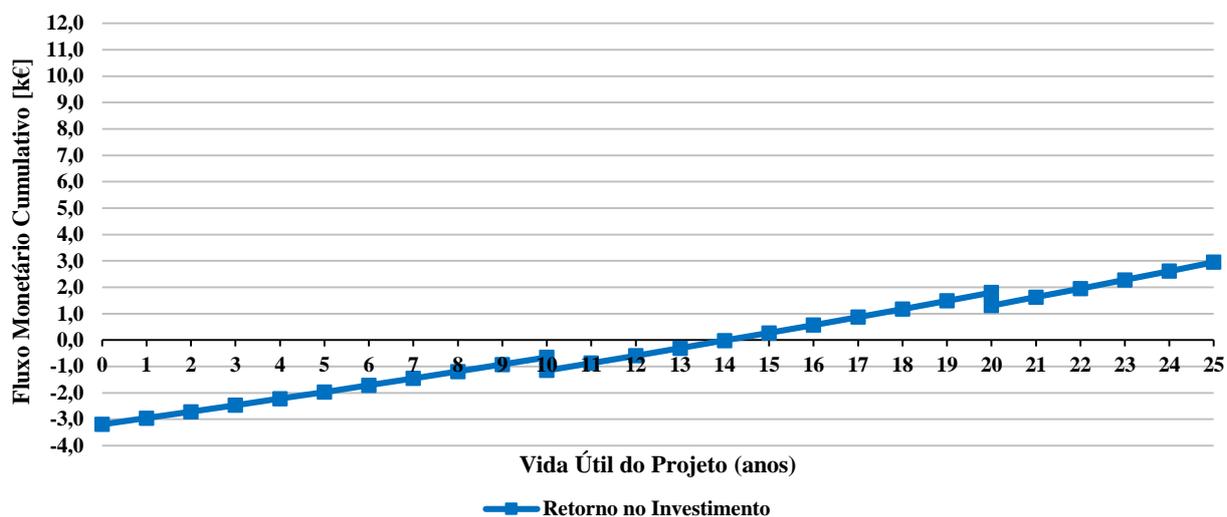


Figura 99 – Linha de retorno do investimento no equipamento instalado em Évora

#### 4.3.2.3. Tempo de retorno do investimento no sistema - Lisboa

Na Tabela 41 são apresentados os valores totais anuais dos consumos energéticos do sistema de ventilação para ambas as situações base e híbrida, do edifício localizado em Lisboa, bem como a poupança atingida com a introdução do permutador de calor ar-solo.

Tabela 41 – Contabilização dos custos energéticos anuais para a cidade de Lisboa

Custos Energéticos Anuais					
Situação	Energia para Aquecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Energia para Arrefecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Energia para Ventilação [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Total Anual [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Poupança Atingida [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
Base	1 210,95	979,39	0,00	2 190,34	
Híbrida	331,19	611,29	137,13	1 079,60	<b>1 110,74</b>

Como se pode observar na tabela acima, a introdução do sistema *EAHE* permitiu uma poupança de 1110,74 kWh/m<sup>2</sup>.ano nos consumos energéticos de ventilação do edifício. Ao converter esta poupança num *cash-flow* em euros e subtrai-lo gradualmente ao valor do investimento no equipamento, considerando o efeito inflacionário, então obtemos o seguinte retorno do investimento no sistema (cumulativo nominal) ao longo dos vários períodos apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 – Tempo de retorno do investimento no equipamento em Lisboa

Período [anos]	<i>Cash-flow</i> [€]	Cumulativo Nominal [€]	Período [anos]	<i>Cash-flow</i> [€]	Cumulativo Nominal [€]
0	-3192,35	-3192,35	12	202,92	-1442,39
1	172,27	-3020,08	13	205,97	-1236,43
2	174,85	-2845,23	14	209,05	-1027,37
3	177,47	-2667,76	15	212,19	-815,18
4	180,14	-2487,62	16	215,37	-599,81
5	182,84	-2304,79	17	218,60	-381,20
6	185,58	-2119,20	18	221,88	-159,32
7	188,36	-1930,84	19	225,21	65,89
8	191,19	-1739,65	20	228,59	-202,13
9	194,06	-1545,59	21	232,02	29,89
10	196,97	-1845,24	22	235,50	265,39
11	199,92	-1645,31	23	239,03	504,42

Segundo a tabela acima, o período de amortização do permutador de calor ar-solo instalado na cidade de Lisboa é de aproximadamente 20 anos e 10 meses, visto que no início do vigésimo primeiro ano de funcionamento já existe um lucro de 29,89€. No gráfico da Figura 100 é apresentada a linha de retorno do investimento para a referida localização.

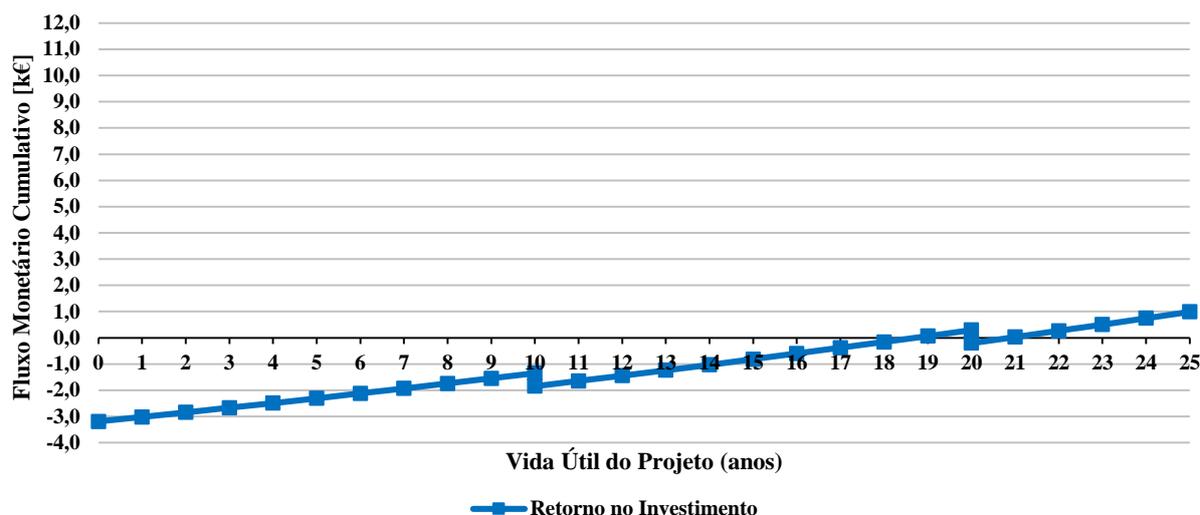


Figura 100 – Linha de retorno do investimento no equipamento instalado em Lisboa

#### 4.3.2.4. Tempo de retorno do investimento no sistema - Porto

À semelhança dos pontos anteriores, na Tabela 43 são contabilizados os custos energéticos anuais totais do sistema de ventilação para a cidade do Porto, para as situações base e híbrida descritas anteriormente, e ainda a poupança atingida com a introdução do sistema *EAHE*.

Tabela 43 – Contabilização dos custos energéticos anuais para a cidade do Porto

Situação	Custos Energéticos Anuais				Poupança Atingida [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
	Energia para Aquecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Energia para Arrefecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Energia para Ventilação [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Total Anual [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	
Base	2 366,33	638,50	0,00	3 004,82	<b>1 608,96</b>
Híbrida	800,70	461,13	134,03	1 395,86	

Como se pode verificar na tabela acima, a introdução do sistema *EAHE* permitiu uma poupança de 1608,96 kWh/m<sup>2</sup>.ano nos consumos energéticos de ventilação do edifício. Ao converter esta poupança num *cash-flow* (expresso em euros) e subtrair gradualmente ao valor do investimento no equipamento, considerando o efeito inflacionário, então obtemos o seguinte retorno do investimento no sistema (cumulativo nominal) ao longo dos vários períodos apresentados na Tabela 44.

Tabela 44 – Tempo de retorno do investimento no equipamento no Porto

Período [anos]	Cash-flow [€]	Cumulativo Nominal [€]	Período [anos]	Cash-flow [€]	Cumulativo Nominal [€]
0	-3192,35	-3192,35	8	276,95	-1088,05
1	249,54	-2942,81	9	281,10	-806,94
2	253,28	-2689,53	10	285,32	-1018,24
3	257,08	-2432,45	11	289,60	-728,64
4	260,94	-2171,52	12	293,94	-434,70
5	264,85	-1906,67	13	298,35	-136,35
6	268,82	-1637,85	14	302,83	166,48
7	272,85	-1364,99	15	307,37	473,85

Como se pode observar na Tabela 44, o período de amortização do permutador de calor ar-solo instalado na cidade do Porto é de aproximadamente 13 anos e 5 meses, visto que no início do décimo quarto ano de funcionamento já existe um lucro de 166,48€. No gráfico da Figura 101 é apresentada a linha de retorno do investimento para a referida localização.

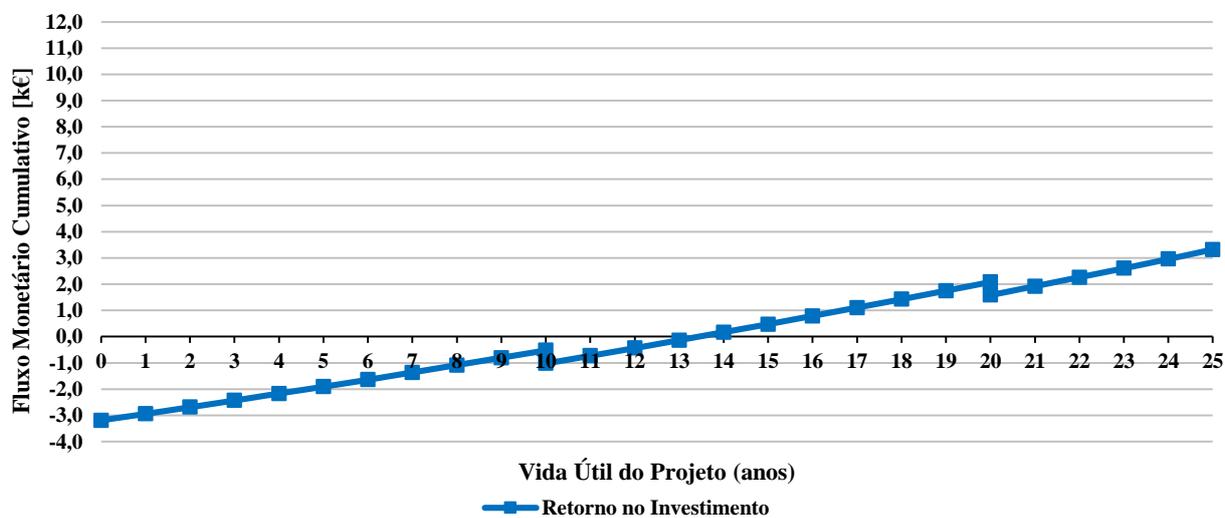


Figura 101 – Linha de retorno do investimento no equipamento instalado no Porto

## 5. Considerações Finais

### 5.1. Conclusões Finais

Na presente dissertação foi analisada a aplicabilidade de sistemas de ventilação com permutador de calor ar-solo no clima português. Para tal, pode-se considerar que ocorreram 3 fases de trabalho distintas: a realização de um estudo paramétrico (para analisar a influência da variação do comprimento, do diâmetro, da profundidade e do material do tubo enterrado), a aplicação dos conhecimentos obtidos a um caso de estudo (o *Wee Building*) e a realização de uma análise económica ao sistema *EAHE* dimensionado para o caso de estudo (na qual se avaliaram os custos dos ciclos de vida do equipamento e o período de retorno do investimento no mesmo). Nas duas primeiras fases descritas acima, foram comparados os valores dos consumos de energia para aquecimento e arrefecimento entre a solução base (sem o sistema *EAHE*) e a solução híbrida (com o sistema *EAHE* em funcionamento).

Começando pelo estudo paramétrico, foram realizadas várias simulações energéticas para determinar o desempenho do sistema de ventilação consoante a variação do comprimento do tubo enterrado. Em todas elas, o tubo foi modelado com um diâmetro de 0,30 metros, a uma profundidade de 4,00 metros e os materiais considerados foram o betão, o aço inox e o PVC. Os comprimentos do tubo enterrado analisados foram os 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 e 200 metros. Nestas simulações energéticas obtiveram-se poupanças de energia anuais para aquecimento, após a introdução do sistema *EAHE* que variaram entre os 589,48 e os 867,88 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o tubo de betão, os 592,62 e os 867,99 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o tubo de aço inox e, por último, entre os 564,96 e os 868,17 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o tubo de PVC. Em termos percentuais, as referidas poupanças correspondem a valores entre os 38% e os 36%, respetivamente para os tubos de betão, aço inox e de PVC com 10 metros de comprimento e de 56% para comprimentos de tubo de 200 metros. Relativamente às poupanças de energia anual para arrefecimento, proporcionadas pela introdução do sistema de permutador de calor ar-solo, estas variaram entre os 57,95 e os 84,95 kWh/m<sup>2</sup>.ano, os 57,94 e os 84,25 kWh/m<sup>2</sup>.ano e entre os 55,10 e os 84,25 kWh/m<sup>2</sup>.ano para os tubos de betão, aço inox e PVC. Estes valores traduzem-se em reduções percentuais do consumo de energia entre os 8% e os 12% para os materiais analisados, todos com 10 e 200 metros de comprimento.

Verificou-se ainda que a influência do comprimento do tubo enterrado assume um papel importante no desempenho do sistema de ventilação da solução híbrida, notando-se uma variação

acentuada da redução dos consumos energéticos para comprimentos sucessivamente crescentes até aos 75 metros e uma variação reduzida para comprimentos entre os 75 e os 200 metros. Além disso, verificou-se ainda que é precisamente entre os 10 e os 75 metros de comprimento que se notam as maiores diferenças de comportamento entre os diferentes materiais do tubo enterrado: os tubos de aço inox e de betão proporcionam as maiores reduções dos consumos, com valores semelhantes entre si, seguidos pelo tubo de PVC. Para valores de comprimento superiores a 75 metros observou-se uma grande linearidade de resultados entre os três materiais analisados.

O segundo parâmetro avaliado no estudo paramétrico, o diâmetro do tubo enterrado, foi analisado realizando diversas simulações energéticas nas quais o permutador de calor ar-solo foi dimensionado a uma profundidade fixa de 4,00 e com um comprimento fixo de 100 metros, recorrendo a tubos de betão, aço inox e PVC. No conjunto de todas as simulações efetuadas para analisar a influência do diâmetro no desempenho do sistema de ventilação foram simulados diâmetros de 0,20 a 1,00 metros, espaçados de 0,10 metros. Conforme ficou demonstrado, as reduções anuais de energia para aquecimento variaram entre os 867,47 e os 735,78 kWh/m<sup>2</sup>.ano, para as situações de um tubo de aço inox com 0,20 metros de diâmetro e de um tubo de PVC com 1,00 metro de diâmetro. Em termos percentuais, as poupanças de energia para aquecimento variaram entre os 56% para os tubos de betão, aço inox e de PVC, respetivamente para o diâmetro de 0,20 metros, e os 47% para os tubos de betão e PVC e os 48% para o tubo de aço inox, respetivamente, com 1,0 metro de diâmetro. Relativamente às poupanças anuais de energia para arrefecimento, observou-se que estas tiveram amplitudes que variaram entre os 84,22 e os 69,46 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o tubo de betão, os 84,23 e os 69,48 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o tubo de aço inox e entre os 84,08 e os 69,25 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o tubo de PVC. Estas amplitudes traduzem-se em reduções percentuais entre os 12% e os 10%, para diâmetros de 0,20 e 1,00 metros respetivamente, iguais para todos os materiais.

É ainda de salientar que, embora se tenham verificado ligeiras diferenças de desempenho para os permutadores de calor ar-solo nos três tipos de materiais analisados, estas não são suficientemente significativas. Os tubos de aço inox e de betão apresentam resultados bastante similares, enquanto o tubo de PVC apresenta resultados ligeiramente inferiores, especialmente na gama de diâmetros entre os 0,30 e os 0,80 metros. Ficou ainda demonstrado que o sistema *EAHE* apresentou os melhores resultados para os diâmetros inferiores, situação que se torna mais evidente entre os 0,50 e os 1,00 metros de diâmetro. É por isso recomendável utilizar diâmetros compreendidos entre os 0,20 e os 0,40 metros para maximizar as reduções de consumo energético para ventilação de espaços.

O terceiro parâmetro estudado no decorrer do estudo paramétrico foi a profundidade do tubo enterrado. Todas as simulações foram efetuadas para um comprimento e um diâmetro fixos de 100 e 0,30 metros, respetivamente, onde se avaliaram os resultados para as profundidades compreendidas entre os 0,50 e os 7,00 metros. Nestas simulações, a redução dos consumos de energia para aquecimento variou entre os 641,74 e os 884,05 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o tubo de PVC enterrado a 0,50 metros de profundidade e para o tubo de aço inox enterrado a 7,00 metros. No conjunto global de simulações efetuadas foram obtidas reduções percentuais entre os 41% e 42% e os 57% para os tubos de betão, aço inox e PVC enterrados a 0,50 e 7,00 metros, respetivamente. Já o consumo de energia para arrefecimento sofreu um aumento de 11,08 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o tubo de betão enterrado a 0,50 metros e reduziu até aos 89,59 kWh/m<sup>2</sup>.ano para o tubo de aço inox enterrado a 7,00 metros de profundidade. Esta amplitude corresponde, em termos estatísticos, a um aumento de 2% e a uma redução de 13%, respetivamente.

À semelhança dos parâmetros analisados anteriormente, a influência da profundidade do tubo enterrado não varia muito consoante o material escolhido. Verificou-se novamente uma grande linearidade de resultados para os três tipos de materiais analisados, sendo difícil criar um ranking. No entanto, como ficou provado, não é aconselhável utilizar profundidades inferiores a 1,00 metros, visto que os consumos de energia para arrefecimento sofrem um ligeiro aumento. À medida que a profundidade do permutador de calor ar-solo aumenta verifica-se um melhor desempenho do sistema de ventilação, especialmente entre os 1,00 e os 4,50 metros de profundidade. Ultrapassada esta gama de profundidades não se verificam benefícios significativos.

A aplicação dos conhecimentos adquiridos no estudo paramétrico a um caso de estudo permitiu perceber quais são os benefícios reais da introdução do sistema de tubos enterrados no solo, por ser aplicado a um edifício mais próximo dos parâmetros convencionais do que a célula de teste modelada. Tal como ficou demonstrado, após a modelação do *Wee Building*, a introdução do sistema *EAHE* dimensionado permitiu reduções bastante significativas dos consumos energéticos para todas as localizações estudadas, com especial relevância para as cidades de Bragança, Porto e Évora. Nestas localizações, a introdução de 135 metros de tubo enterrado em PVC permitiu poupanças nos consumos anuais de energia para ventilação de 3537,42, 1742,99 e 1666,31 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Já no caso de Lisboa, o mesmo comprimento de tubo enterrado permitiu uma poupança dos mesmos consumos de energia de 1247,86 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

Como ficou demonstrado com os resultados obtidos para o caso de estudo, as poupanças de energia em todas as localizações consideradas foram significativamente superiores na estação de aquecimento. Em termos percentuais, as poupanças anuais de energia para aquecimento obtidas

foram de 72% em Bragança, 74% em Évora, 75% em Lisboa e 76% no Porto. Os resultados obtidos indicam que as poupanças de energia para aquecimento são sucessivamente crescentes no sentido das localizações com a temperatura média do ar exterior mais elevada ao longo da estação de aquecimento. Não obstante o facto de, em termos absolutos, a maior redução dos consumos de energia para aquecimento ter ocorrido em Bragança (visto ser a localização que apresentava os consumos mais elevados para a solução base), em termos percentuais foi a localização que obteve a poupança anual média mais reduzida. Ao invés, a cidade do Porto foi a que apresentou a maior redução percentual dos consumos de energia para aquecimento por beneficiar de um clima mais ameno. Assim, é possível concluir que o desempenho do sistema *EAHE* é superior em climas com estações de aquecimento menos frias. Comparativamente com os consumos de energia para aquecimento, os consumos de energia para arrefecimento sofreram uma redução menos significativa. As poupanças de energia no decorrer da estação de arrefecimento foram de 34%, 33%, 37% e 34% nomeadamente para as cidades de Bragança, Évora, Lisboa e Porto. Ao contrário do que aconteceu com as poupanças de energia para aquecimento, as poupanças relativas à estação de arrefecimento não obtiveram uma relação direta com o clima onde se inserem. Verificou-se antes uma maior linearidade de resultados sem uma influência evidente das condições climatéricas.

Para compreender quais são as localizações nas quais a colocação do sistema *EAHE* é mais proveitosa foi efetuada uma análise económica e determinou-se que o tempo de retorno para o investimento inicial de 3192,35€ no referido sistema foi de 5 anos e 10 meses em Bragança, de 14 anos e 1 mês em Évora, 20 anos e 10 meses em Lisboa e 13 anos e 5 meses no Porto. Concluiu-se, portanto, que a localização em Bragança é a que mais beneficia com a introdução do sistema *EAHE* ao apresentar o tempo de retorno do investimento mais baixo. Já nos casos de Évora e Porto, localizações que apresentam resultados intermédios, a introdução do sistema de permutador de calor ar-solo continua a ser uma opção a considerar, visto que o proprietário recupera o investimento inicial em menos de 15 anos. Relativamente à localização de Lisboa, a localização que apresentou o tempo de retorno no investimento mais elevado, o resultado obtido foi de aproximadamente 21 anos. Embora este valor seja mais elevado que os anteriores, no entanto, se considerarmos que o tempo de vida útil de um edifício residencial ronda os 50 anos, é possível concluir que a instalação do equipamento continua a ser vantajosa.

Os resultados obtidos nas várias localizações provam que a ideia de que a eventual utilização de permutadores de calor ar-solo em climas temperados elimina a necessidade de recorrer a outros meios de climatização dos espaços interiores não está completamente correta. Como se pode

observar nos resultados obtidos, todas as localizações beneficiam com a introdução do sistema *EAHE*. No entanto, mesmo para a localização de Bragança, que foi a que mais beneficiou com a introdução do referido sistema, continuaram a existir consumos de energia tanto para aquecimento como para arrefecimento. Tal como ficou provado, a aplicabilidade do sistema *EAHE* em Portugal é não só possível como eficaz, especialmente para localizações com uma estação de aquecimento mais rigorosa. Estes resultados corroboram estudos recentes efetuados na Turquia e em Itália, os quais concluíram que a introdução de permutadores de calor ar-solo em edifícios sujeitos ao clima mediterrânico é benéfica mas não o suficiente para eliminar necessidades adicionais de climatização. Ficou então provado que a aplicabilidade do sistema *EAHE* em Portugal é possível e benéfica para todas as localizações estudadas.

Não obstante, por todos os motivos apresentados anteriormente e pelas vantagens económicas, ambientais e sociais proporcionadas pelos permutadores de calor ar-solo, estes constituem um sistema passivo de redução dos consumos energéticos bastante eficaz e relativamente barato perante os benefícios que proporciona.

## **5.2.Desenvolvimentos futuros**

Como possíveis desenvolvimentos futuros aponta-se a necessidade de estudar a influência do tipo de solo nos resultados obtidos, bem como o estudo da influência dos vários revestimentos da camada superficial do solo e a quantidade de humidade presente, para que se possa definir de uma forma mais precisa a eficiência do sistema *EAHE* para cada tipo de solo e respetiva cobertura. Assim, ao estudar a influência dos tipos de solos mais característicos da geologia portuguesa e as condições mais frequentes, poderá maximizar-se os resultados obtidos neste estudo e compreender de uma forma mais precisa como varia o desempenho do sistema *EAHE* ao longo das várias estações do ano.

Futuramente, é também de relativa importância estudar a influência que o fluxo de ar a circular através dos tubos enterrados tem no desempenho do sistema de permutador de calor ar-solo. Ao estudar parametricamente este parâmetro poder-se-á determinar de uma forma mais sucinta como os resultados energéticos dos edifícios poderão ser melhorados. Em adição, seria também possível determinar uma taxa ótima de fluxo de ar consoante a localização do edifício e a estação do ano.

Outro aspeto a desenvolver de uma forma mais aprofundada em trabalhos futuros é a influência que o volume da divisão servida pelo sistema *EAHE* tem no dimensionamento dos tubos enterrados. O objetivo poderia ser realizar um estudo paramétrico no qual se estudaria o dimensionamento do permutador de calor ar-solo em termos de comprimento, diâmetro e profundidade à medida que se fazia variar o volume da divisão do edifício.

Por último, refere-se a necessidade de analisar futuramente a otimização do funcionamento conjunto do sistema de tubos enterrados com os equipamentos de climatização selecionados. Ao realizar o *benchmarking* das melhores conjugações de equipamentos de ventilação será possível ajustar de uma forma efetiva e precisa o funcionamento de um sistema híbrido em que os consumos energéticos sejam ainda mais reduzidos.

## 6. Referências Bibliográficas

- ADEME**, (2012), French know-how in the field of Geothermal Energy, District heating and electricity generation systems, Angers, França.
- ADENE** - Agência para a Energia, (2003), *Prémios DGE 2003 Eficiência Energética em Edifícios*, Lisboa, Portugal.
- ADENE** - Agência para a Energia, (2012), *Guia da Eficiência Energética*, 4<sup>o</sup> Edição, Lisboa, Portugal.
- Ajmi, F., Loveday, D., Hanby, V.**, (2006), The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate, *Building and Environment*, vol. 41, pp. 235-244.
- ASHRAE Standard 90.1-2010**, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- ASHRAE Standard 140-2001**, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- Banco de Portugal**, (2014), Boletim Económico - Projeções para a Economia Portuguesa: 2014-2016, Lisboa, Portugal.
- Bansal, V., Mathur, J.**, (2009), Performance enhancement of earth air tunnel heat exchanger using evaporative cooling, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 00, pp. 1-9.
- Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G., Mathur, J.**, (2009), Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating, *Energy and Buildings*, vol. 41, pp. 1151-1154.
- Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G., Mathur, J.**, (2010), Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling. *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 645-648.
- Bojicǐ, M., Trifunovic, N., Papadakis, G., Kyritsis, S.**, (1997), Numerical simulation, technical and economic evaluation of earth to air heat exchanger coupled to a building, *Energy*, vol. 22, pp. 151-158.

- Boyd, T., Lund, J., Freeston, D.,** (2011), Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review, *Geothermics*, vol. 40, pp. 159-180.
- Brundtland, G. H.,** (1987), World Commission on Environment and Development: Our Common Future, Oxford University Press, Oxford, Reino Unido.
- Cahen, D., Lubomirsky, I.,** (2008), Energy, the global challenge, and materials, *Materials Today*, vol. 11, pp. 16-20.
- Çamur, D., Vaizoğlu, S.A.,** (2007), Important meeting and documents about environment, Turkish General Staff, *Preventive Medicine Bulletin*, vol. 6.
- Carlos, J., Silva, P., Gomes, J., Corvacho, H.,** (2010), Pré-aquecimento do ar de ventilação: Recomendações para estratégias bioclimáticas, *Engenharia Civil*, vol. 38, pp. 45-56.
- De Paepe, M., Janssens, A.,** (2002), Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers, *Energy and Buildings*, vol. 35, pp. 389-397.
- Dickson, M., Fanelli, M.,** (2003), Geothermal Energy: Utilization and Technology, *UNESCO Renewable Series*, pp. 1-28.
- Direção-Geral de Energia e Geologia,** (2014), *Fatura Energética Portuguesa*, nº. 30, Lisboa, Portugal.
- Dorian, J., Franssen, H., Simbeck, D., MD.,** (2005), Global challenges in energy, *Energy Policy*, vol. 34, pp. 1984-1991.
- EnergyPlus,** (2013), Getting Started with EnergyPlus - Basic Concepts Manual - Essential Information You Need about Running EnergyPlus, United States Department of Energy, Washington D. C..
- ERSE-** Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, (2014), Preços das Tarifas Transitórias de Venda a Clientes Finais em Portugal Continental, Lisboa, Portugal.
- Florides, G., Kalogirou, S.,** (2007), Ground heat exchangers – A review of systems, models and applications, *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 2461-2478.

- Gençay, G., Goşkun, A.,** (2011), Kyoto Protocol and “deforestation” – A legal analysis on Turkish environment and forest legislation, *Forest Policy and Economics*, vol. 13, pp. 366-377.
- Ghosal, M., Tiwari, G.,** (2006), Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse, *Energy Conversion and Management*, vol. 47(13-14), pp. 1779-1798.
- Ghosal, M., Tiwari, G., Srivastava, N.,** (2004), Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger, an experimental validation, *Energy and Buildings*, vol. 36(3), pp. 219-227.
- Givoni, B.,** (2007), Cooled soil as a cooling source for buildings, *Solar Energy*, vol. 81, pp. 316-328.
- Goswami, D., Dhaliwal, A.,** (1990), Heat transfer analysis in environmental control using underground air tunnel, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 107, pp. 141-145.
- Goswami, D., Ileslamlou, S.,** (1990), Performance analysis of a closed loop climate control system using underground air tunnel, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 112, pp. 76-81.
- Kabashnikov, V., Danilevskii, L., Nekrasov, V., Vityaz, I.,** (2002), Analytical and numerical investigation of the characteristics of a soil heat exchanger for ventilation systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 2407-2418.
- Mathur, J., Misra, R., Bansal, V., Agarwal, G., Aseri, T.,** (2012), Thermal performance investigation of hybrid earth-air tunnel heat exchanger, *Energy and Buildings*, vol. 49, pp. 531-535.
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D.,** (1992), Modeling the earth temperature using multi year measurements, *Energy and Buildings*, vol. 19, pp. 1-9.
- Mogensen, P.,** (1983), Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages, *Proceedings of the International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice*, pp. 652-657.

- Monteiro, M.**, (2008), *Permutadores de calor ar-solo. Análise de pré-viabilidade*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Ozgener, L.**, (2011), A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 4483-4490.
- Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., Rosen, MA.**, (2007), Exergonomic analysis of geothermal district heating systems: a case study, *Applied Thermal Engineering*, vol. 27(8-9), pp. 1303-1310.
- Ramanathan, V., Feng, Y.**, (2008), Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives, *Atmospheric Environment*, vol. 43, pp. 37-50.
- Romero, F.**, (2013), *Fundamentos de Avaliação Económica de Projetos*, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Santamouris, M., Mihalakakou, G., Asimakopoulos, D., Lewis, J.**, (1997), On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles, *Solar Energy*, vol. 60, pp. 181-190.
- Siber Ventilación**, (2014), *Casa Eficiente, ahorro energético, confort y salud*, Barcelona, Espanha.
- Scott, N., Parsons, R., Kochler, T.**, (1965), Analysis and performance of an earth-air heat exchanger, *ASAE Paper*, vol. 65, pp. 840-867.
- Sharan, G., Jadhav, R.**, (2003), Performance of single pass earth-tube heat exchanger: an experimental study, *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 40, pp. 1-8.
- United States Department of Agriculture**, (1960), *Power to Produce, Yearbook of Agriculture*, Washington D.C., United States of America.
- Wu, H., Wang, S., Zhu, D.**, (2007), Modeling and evaluation of cooling capacity of earth air pipe systems, *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 1462-1471.
- Arch Daily**, <http://www.archdaily.com/49917/ad-interviews-scot-horst/10-30/>, 20/02/2013.

**California State University,**

[http://www.csus.edu/arc/Public\\_Outreach%20Inyo\\_Mono/images/4-2-ETHNO.jpg](http://www.csus.edu/arc/Public_Outreach%20Inyo_Mono/images/4-2-ETHNO.jpg),  
17/02/2013.

**CYPE** - Gerador de Preços na Construção, <http://www.geradordeprecos.info/>, 07/05/2014.

**Harmony House Santa Monica,** Chimney Effect used for natural ventilation,  
<http://harmonyhousesantamonica.com/images/ChimneyEffect.jpg>, 23/02/2013.

**Hevar,** <http://www.hevar.co.uk/wp-content/uploads/2012/01/HEVAR-SLIDES-final-version-24-5>, 26/02/2013.

**Home Addition Plus,**

[http://www.homeadditionplus.com/images/home\\_pics/Hydronic\\_Baseboard\\_Heater.jpg](http://www.homeadditionplus.com/images/home_pics/Hydronic_Baseboard_Heater.jpg), 28/01/2014.

**LNEG** - *Laboratório Nacional de Energia e Geologia,*  
[http://www.lneg.pt/download/4078/BrochuraSolarXXI\\_Dezembro2005.pdf](http://www.lneg.pt/download/4078/BrochuraSolarXXI_Dezembro2005.pdf),  
15/02/2013.

**Reabilitação e Manutenção de Edifícios,**

<http://reabilitacaodeedificios.dashofer.pt/?s=modulos&v=capitulo&c=12357>,  
11/01/2014.

**Saturn Resource Management,** <http://cms.srmi.biz/website//images/CnvctionBaseArrws.jpg>,  
28/01/2014.

**Top Alternative Energy Sources,** <http://www.top-alternative-energy-sources.com/images/geothermal-heating-systems.gif>, 10/02/2013.



## 7. Anexos

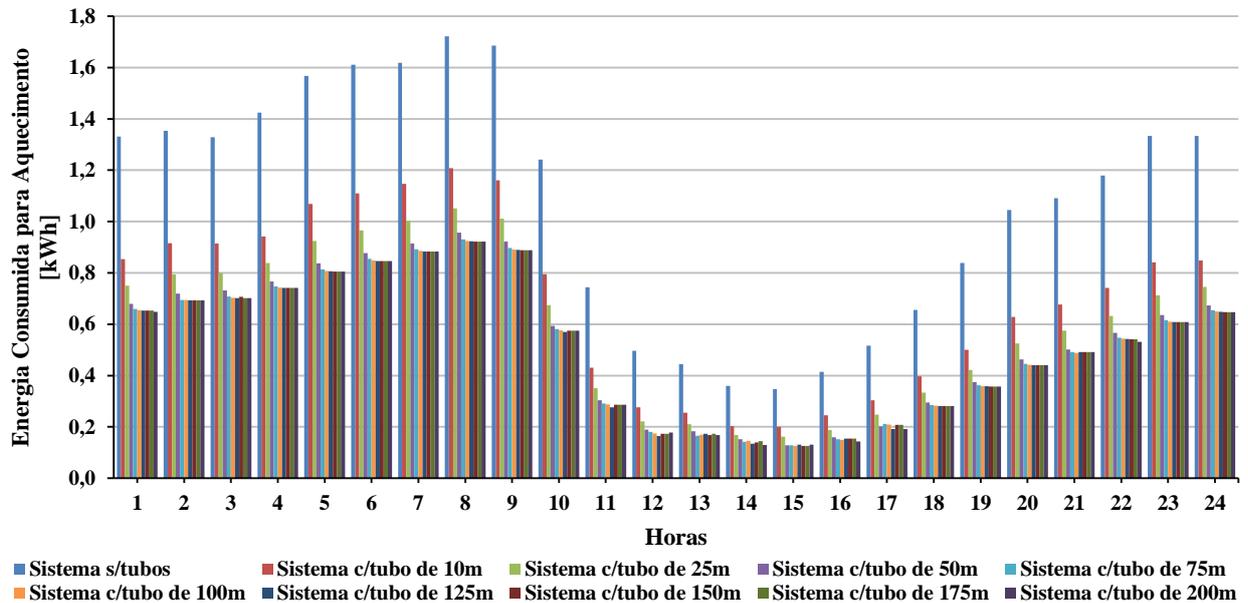


Figura 102 - Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação do comprimento do tubo de aço inox

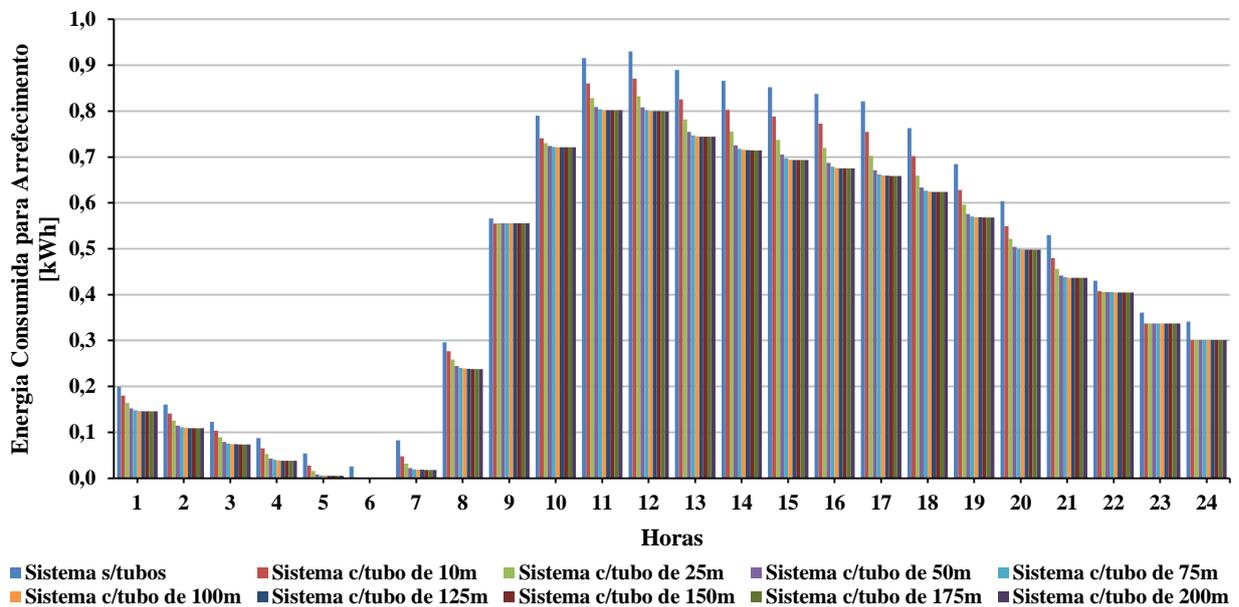


Figura 103 - Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação do comprimento do tubo de aço inox

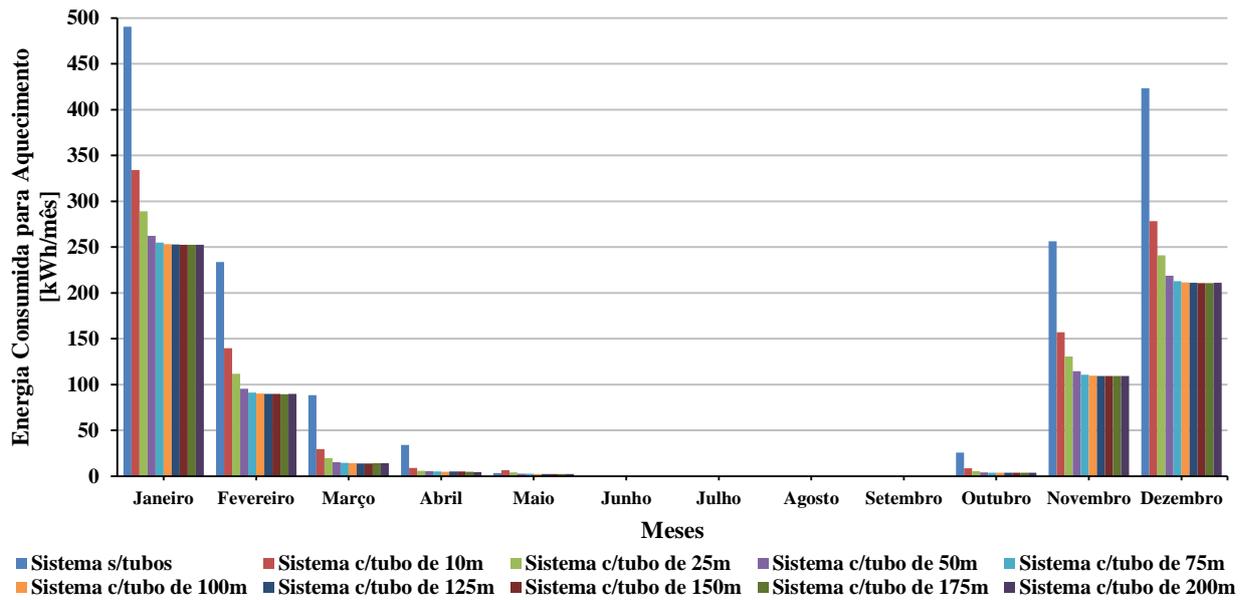


Figura 104 – Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação do comprimento do tubo de aço inox

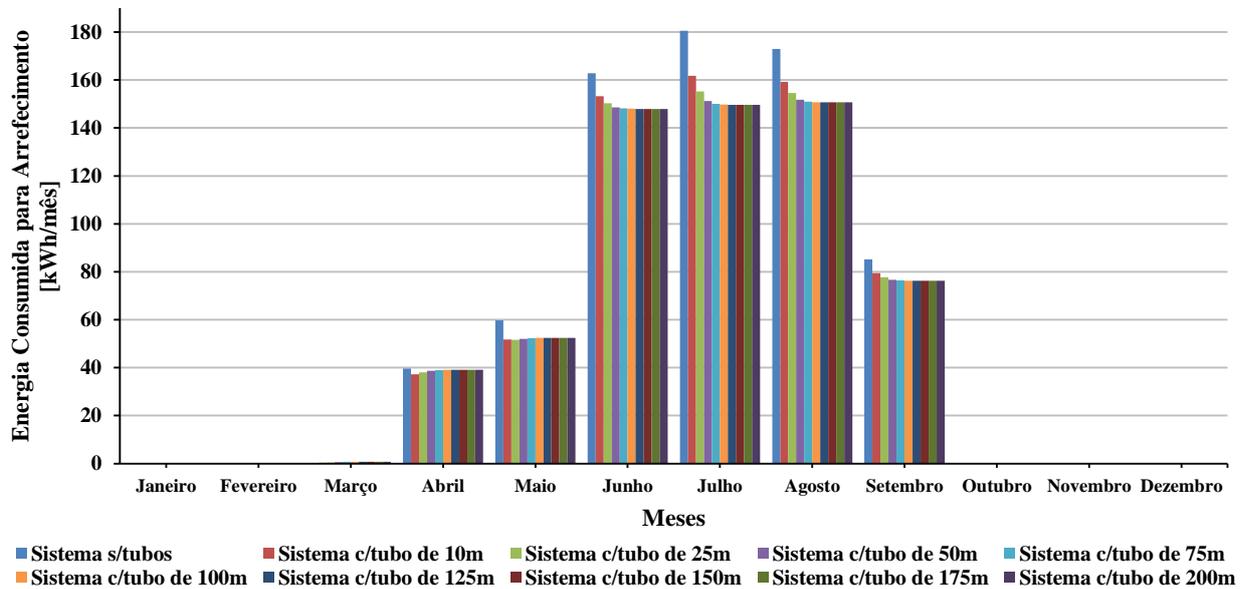


Figura 105 – Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação do comprimento do tubo de aço inox

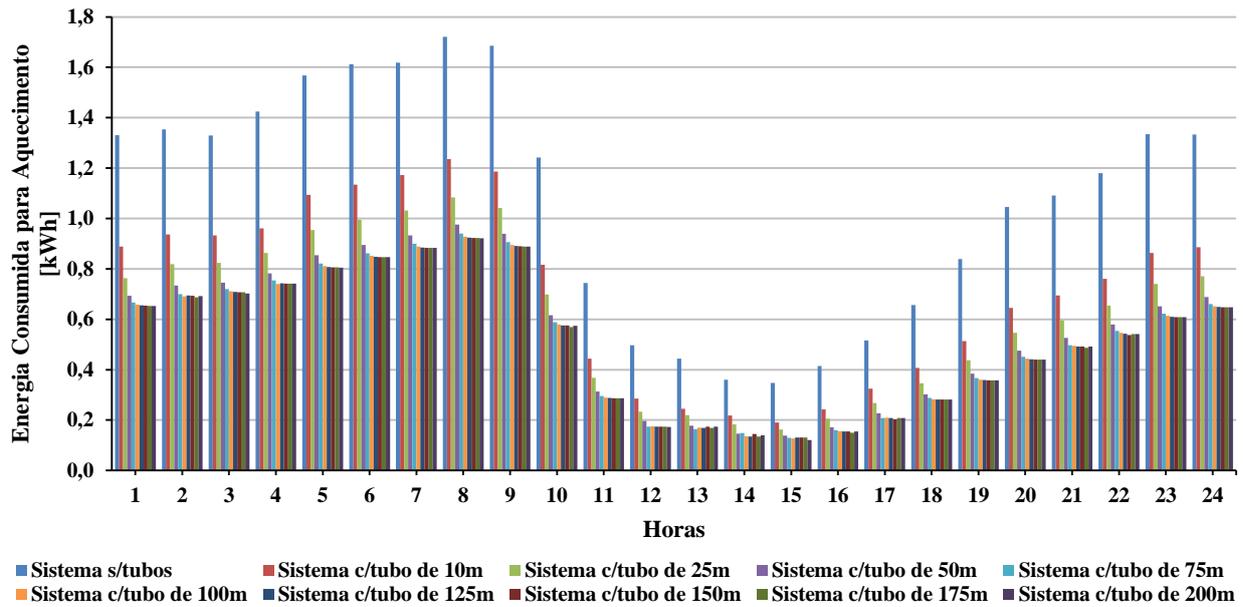


Figura 106 – Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação do comprimento do tubo de PVC

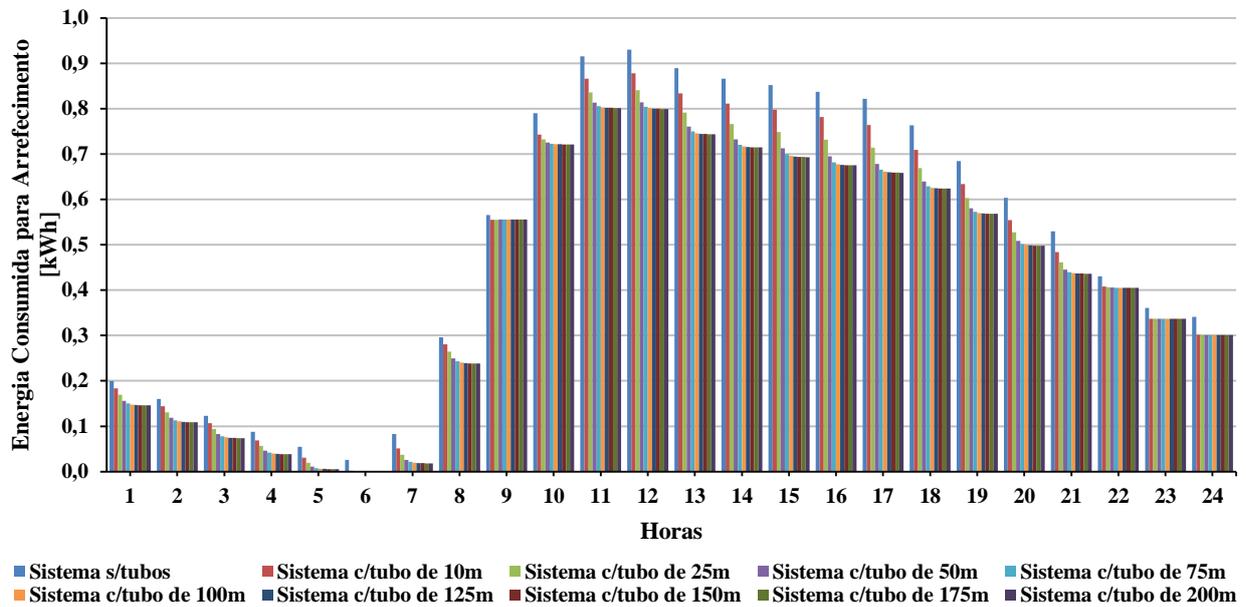


Figura 107 - Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação do comprimento do tubo de PVC

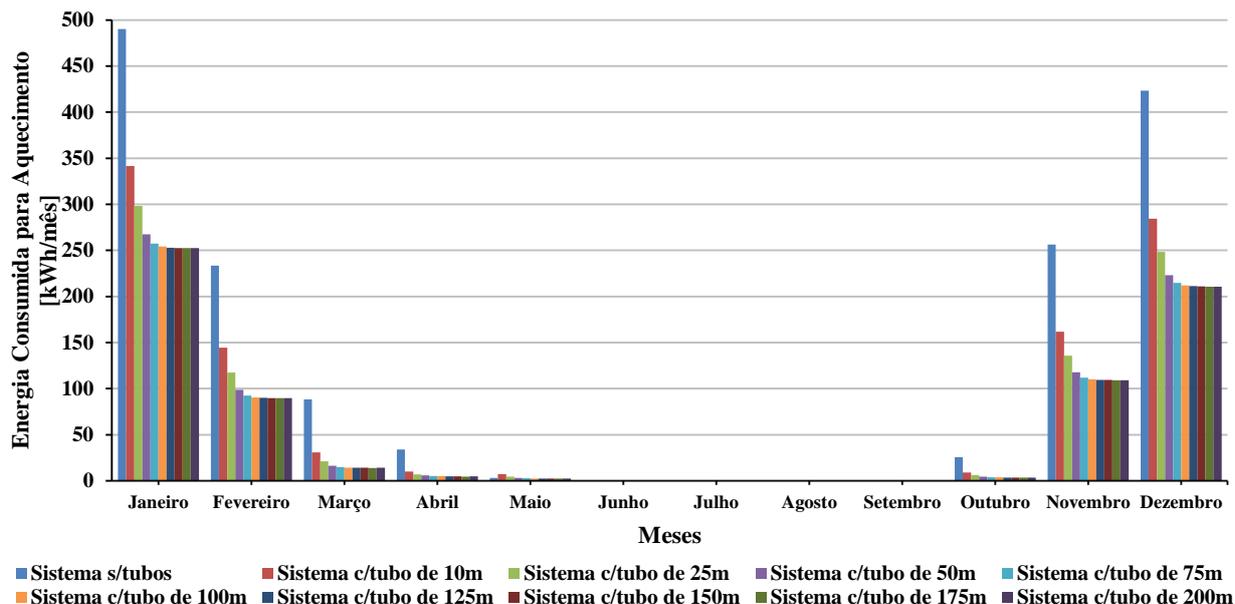


Figura 108 - Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação do comprimento do tubo de PVC

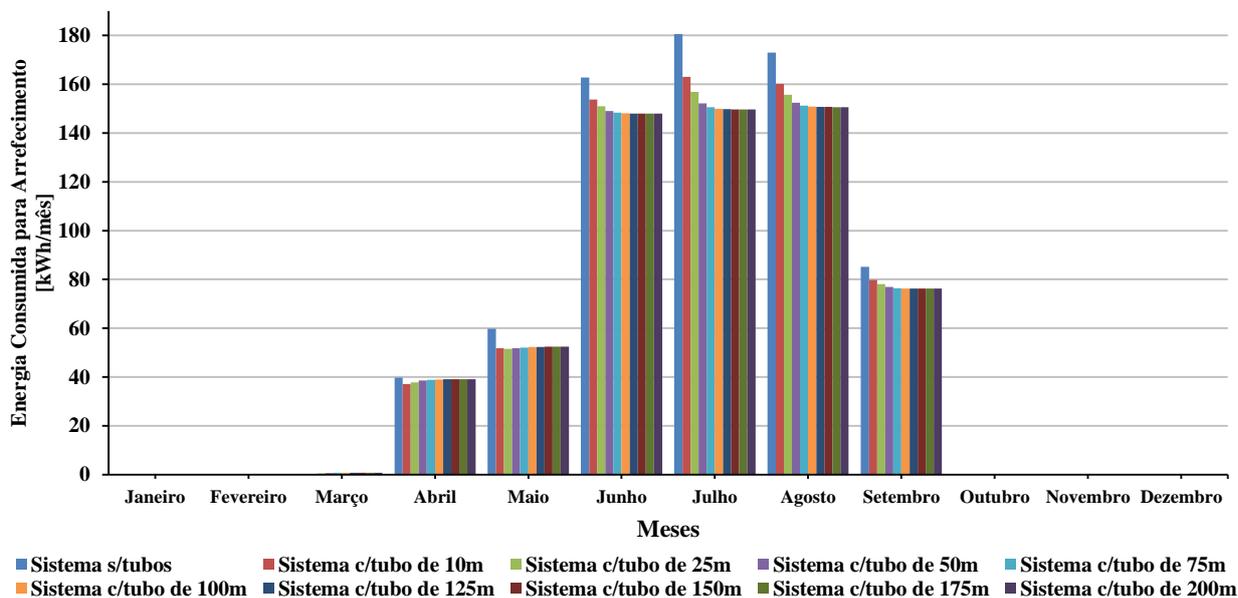


Figura 109 - Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação do comprimento do tubo de PVC

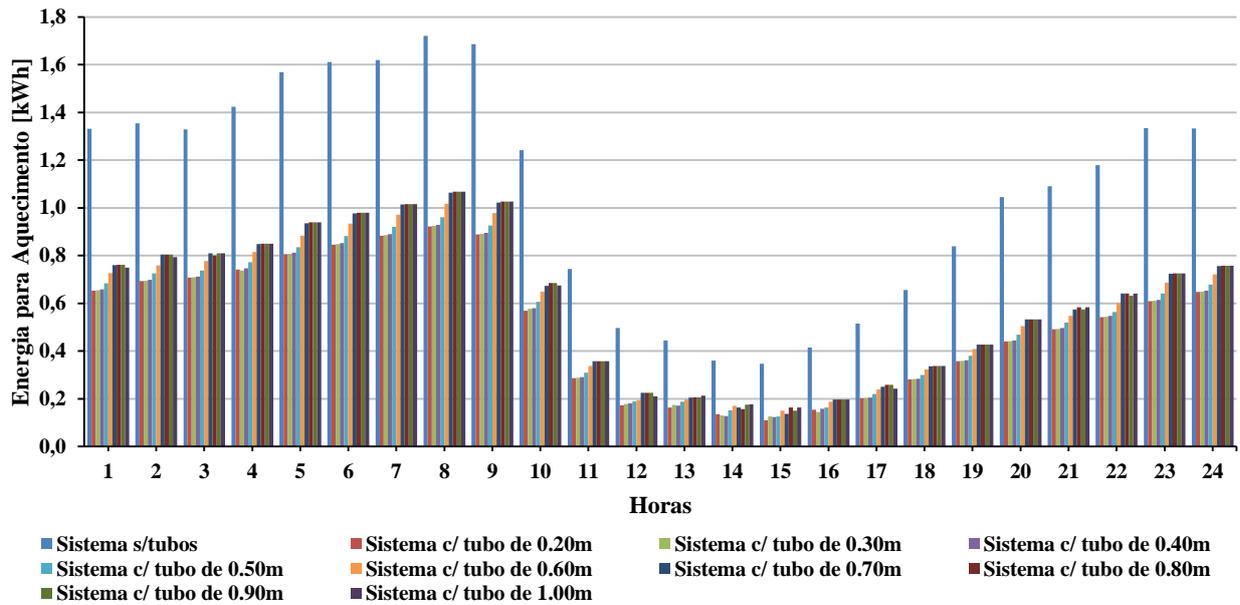


Figura 110 - Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de aço inox

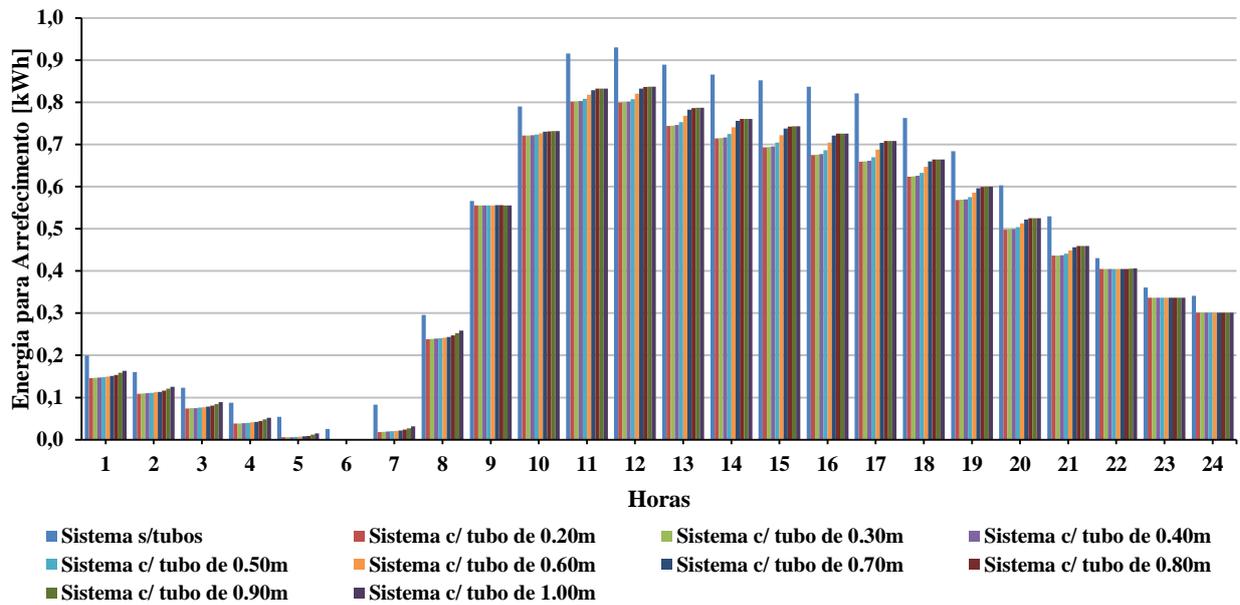


Figura 111 – Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de aço inox

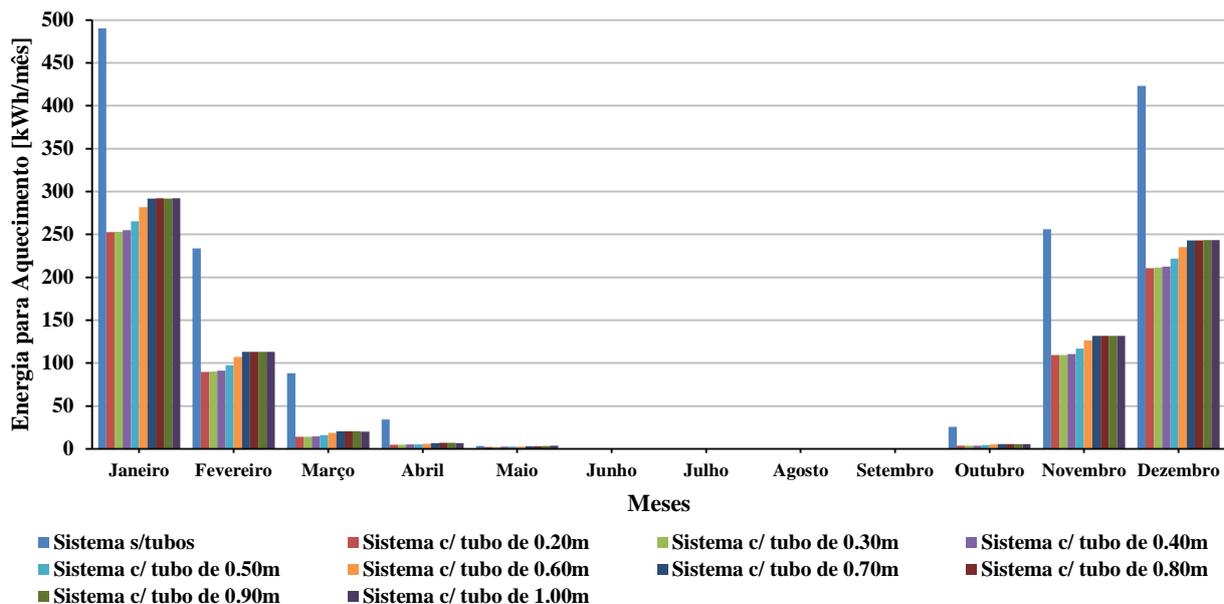


Figura 112 – Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de aço inox

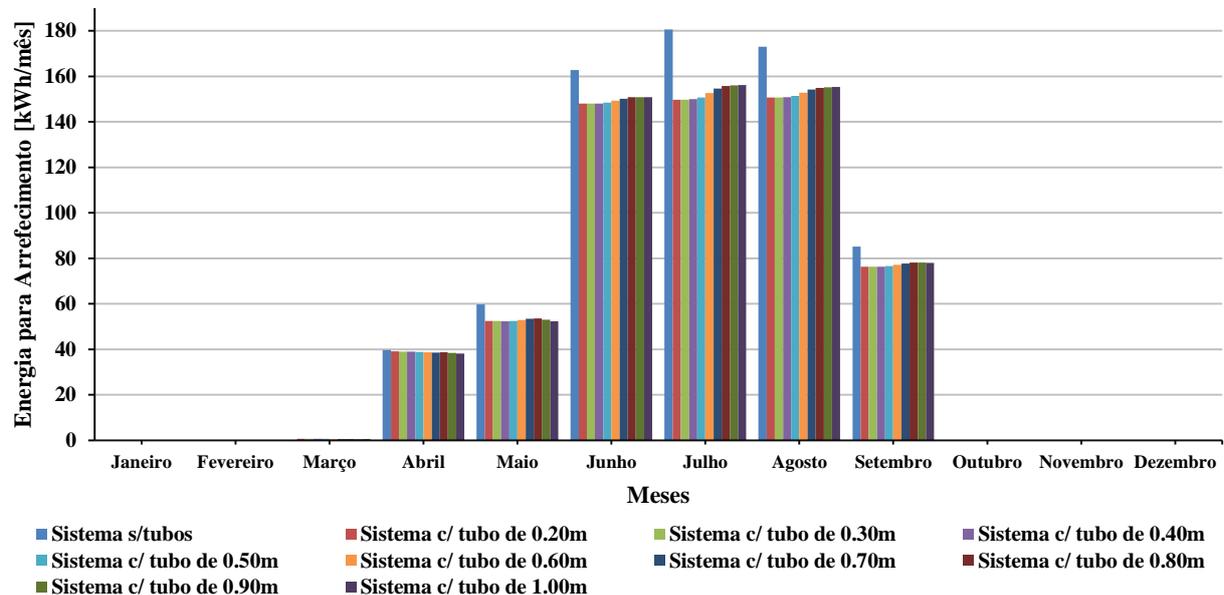


Figura 113 – Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de aço inox

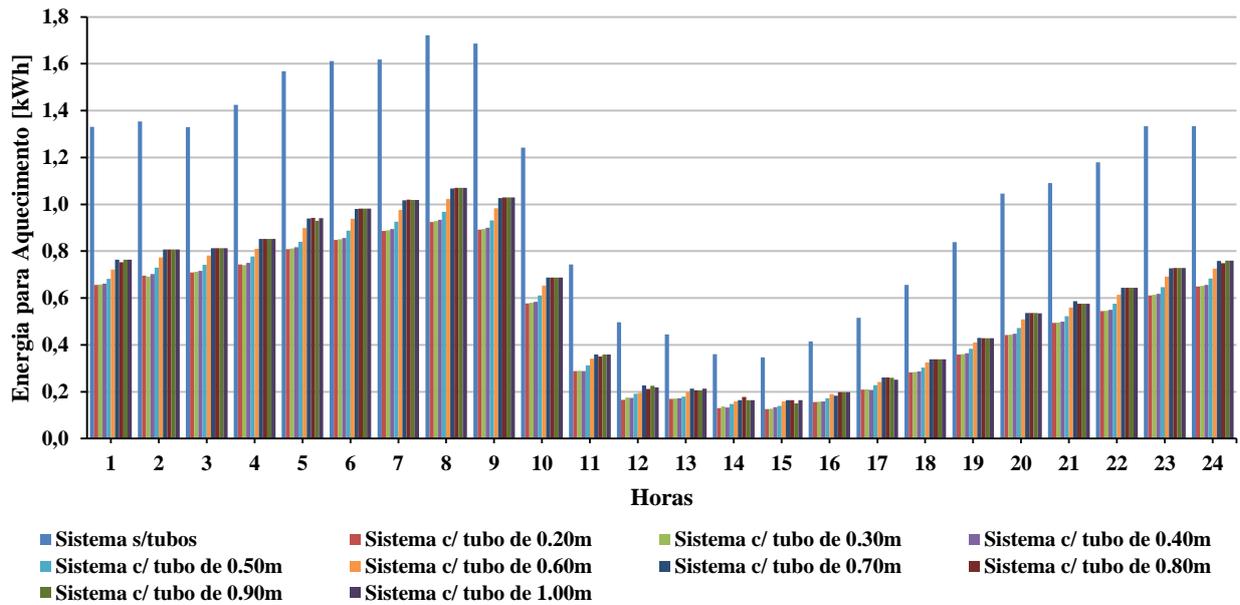


Figura 114 – Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de PVC

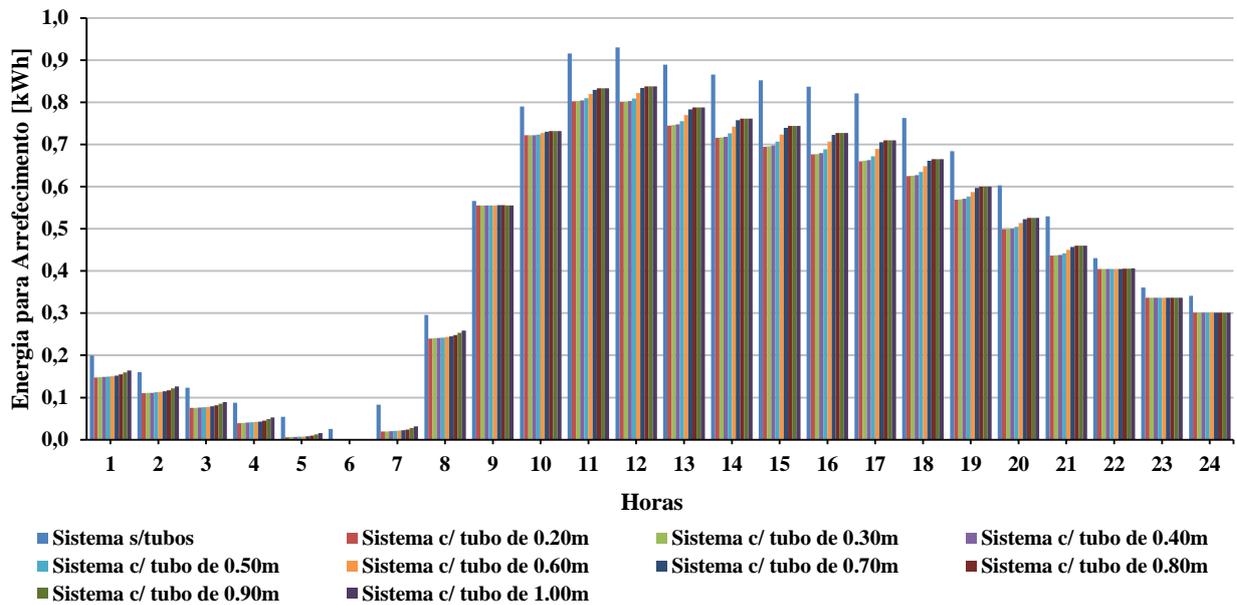


Figura 115 – Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de PVC

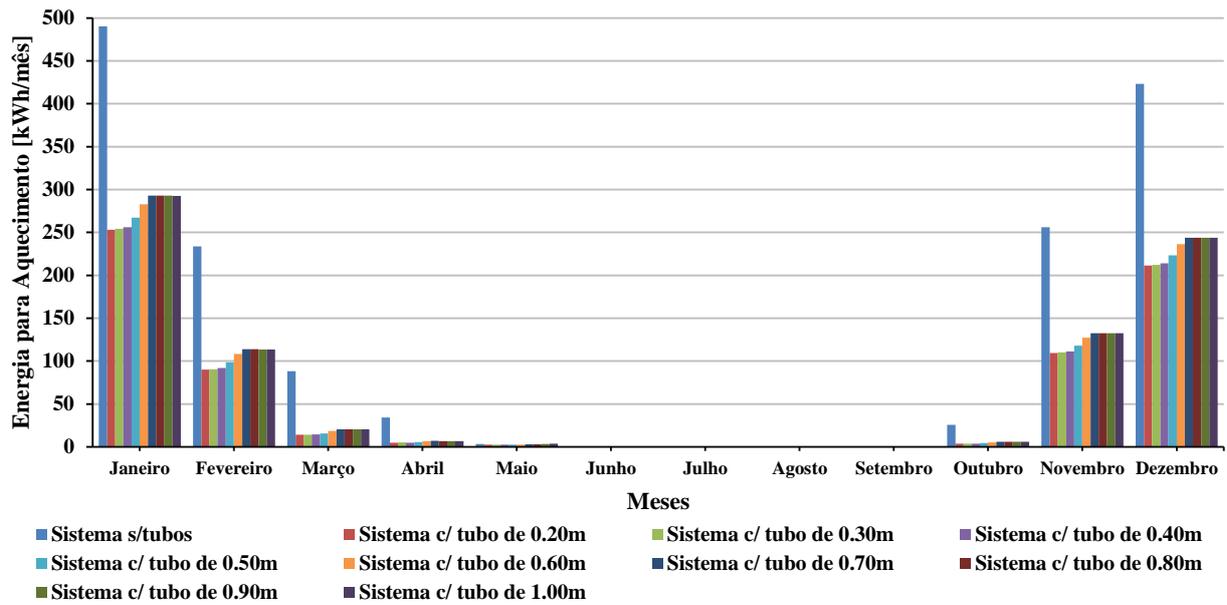


Figura 116 – Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de PVC

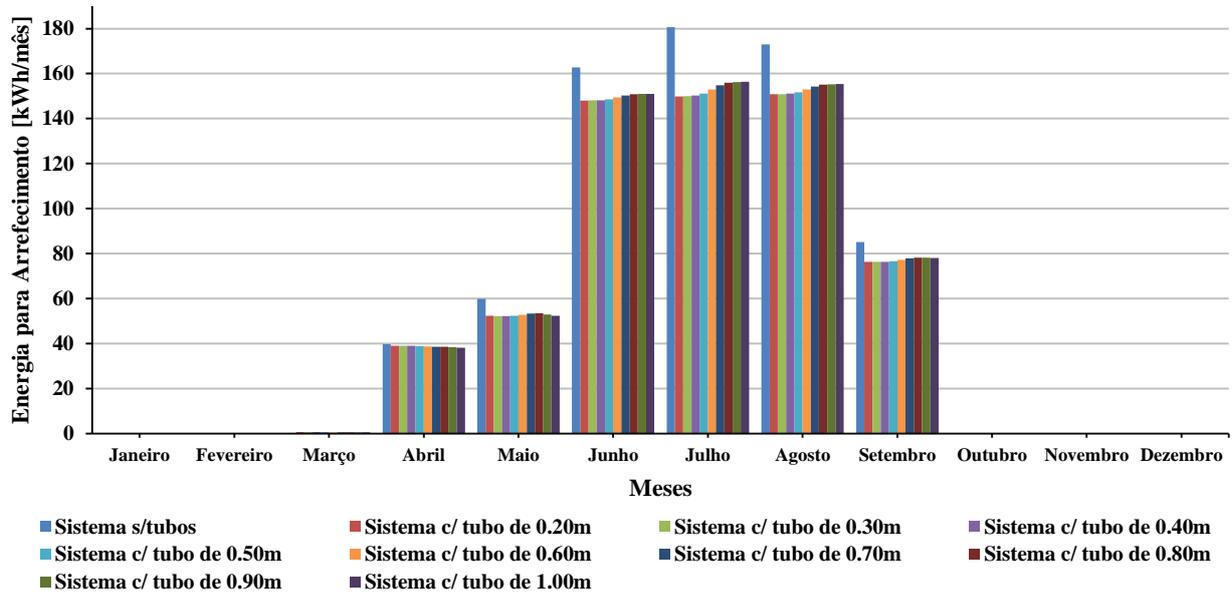


Figura 117 – Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação do diâmetro do tubo de PVC

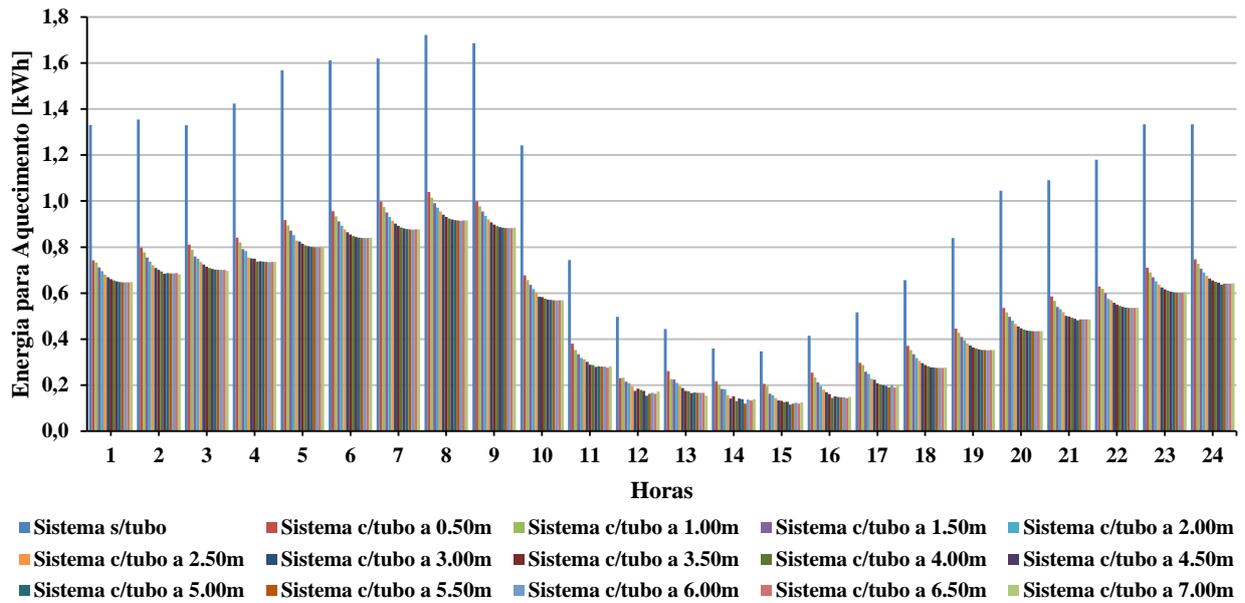


Figura 118 - Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação da profundidade do tubo de aço inox

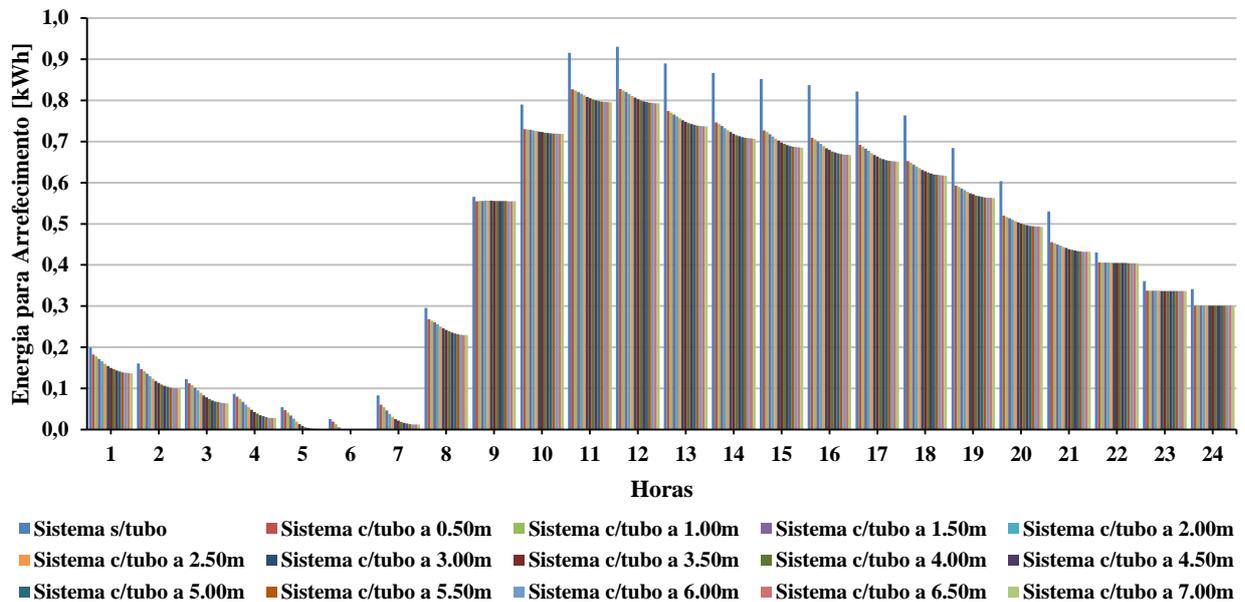


Figura 119 - Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação da profundidade do tubo de aço inox

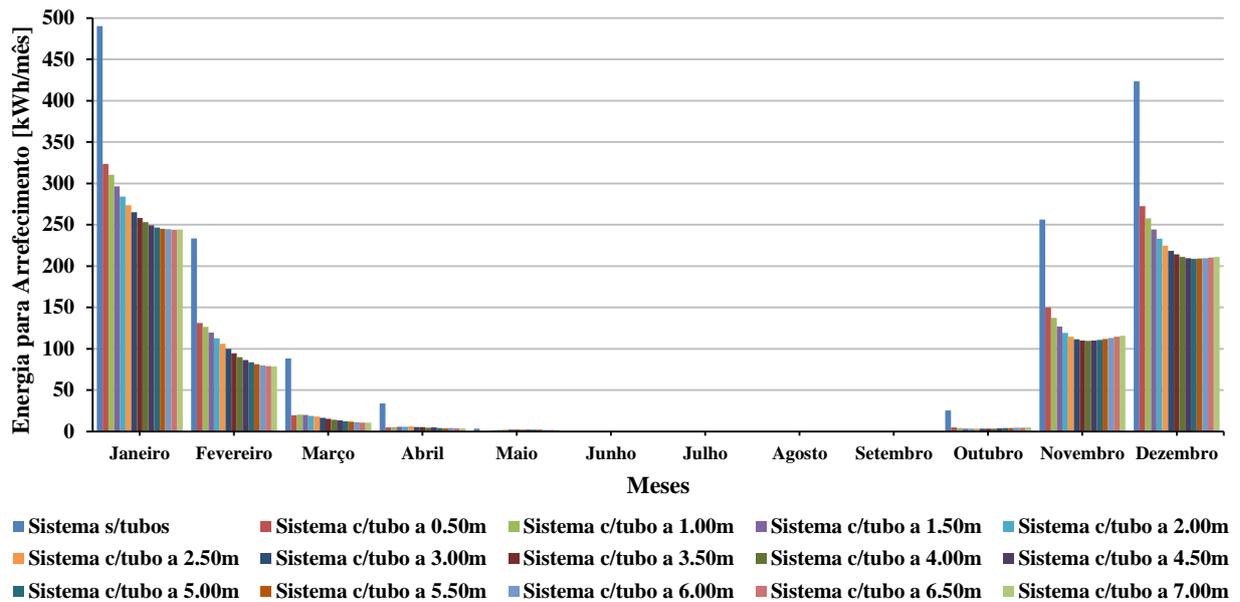


Figura 120 - Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação da profundidade do tubo de aço inox

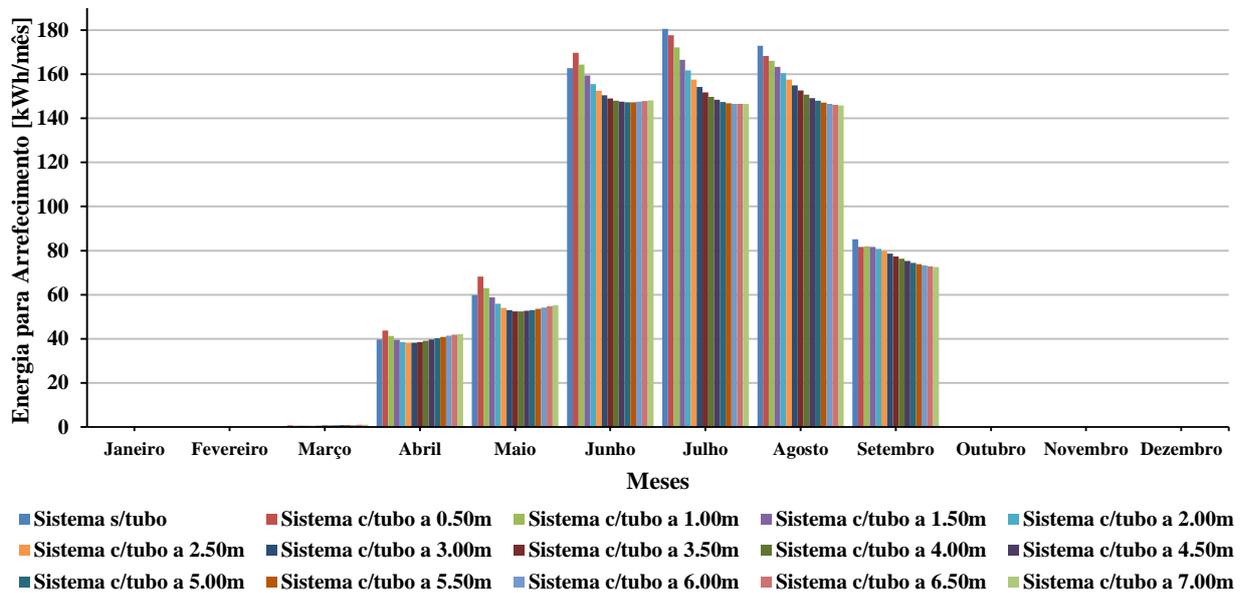


Figura 121 - Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação da profundidade do tubo de aço inox

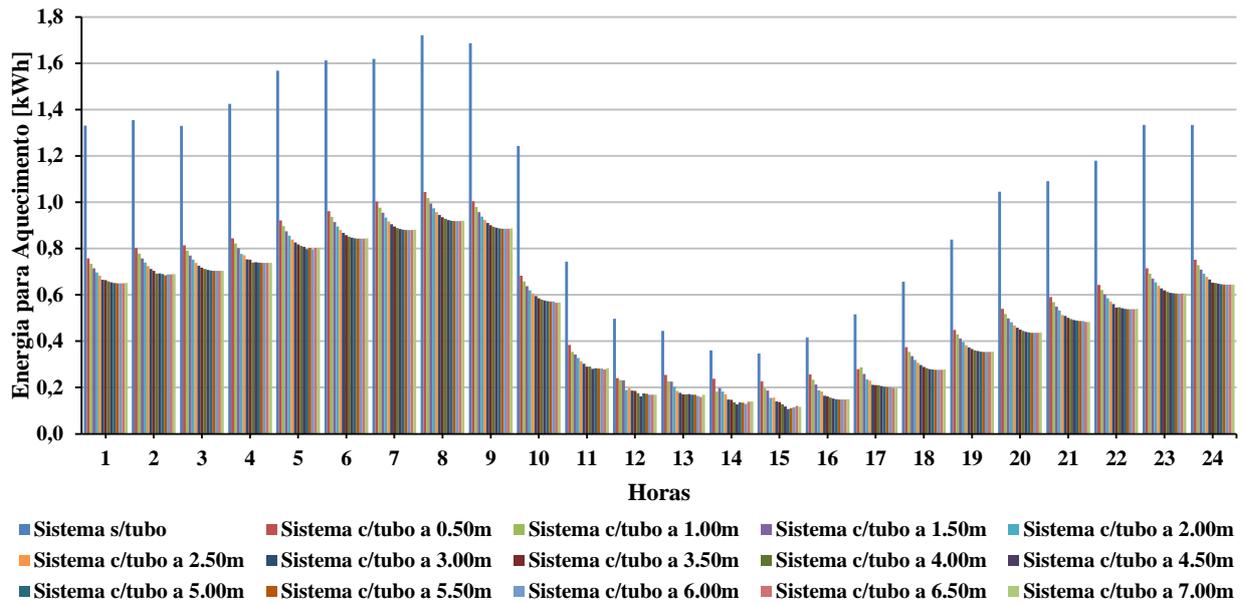


Figura 122 - Consumo de energia para aquecimento no dia 2 de Janeiro, de acordo com a variação da profundidade do tubo de PVC

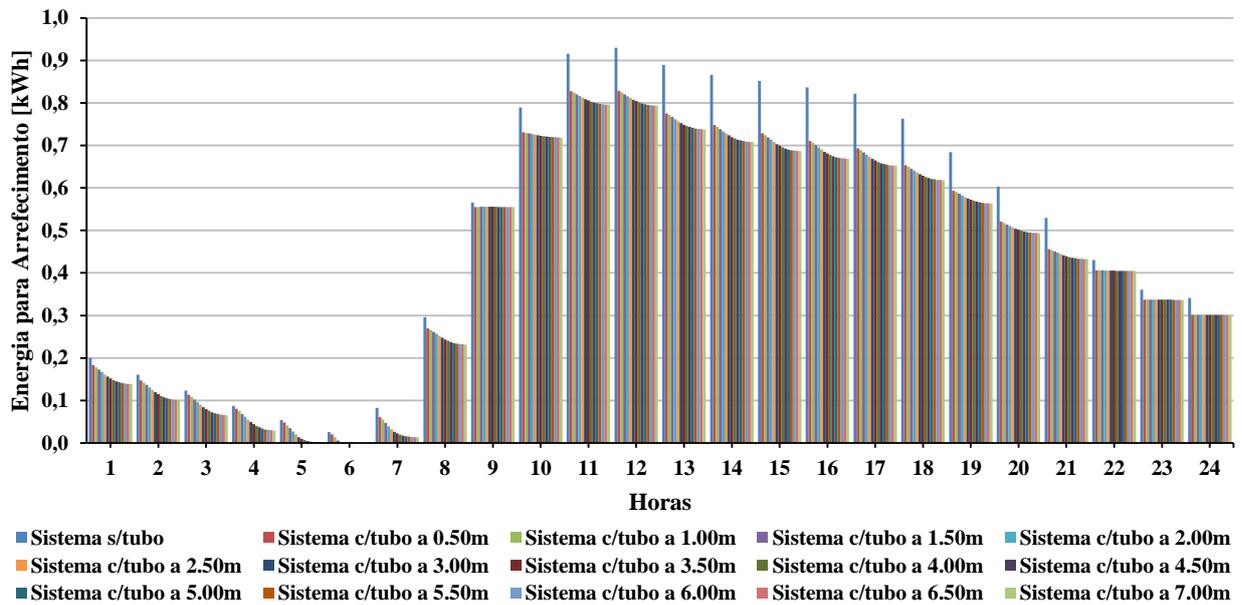


Figura 123 - Consumo de energia para arrefecimento no dia 10 de Agosto, de acordo com a variação da profundidade do tubo de PVC

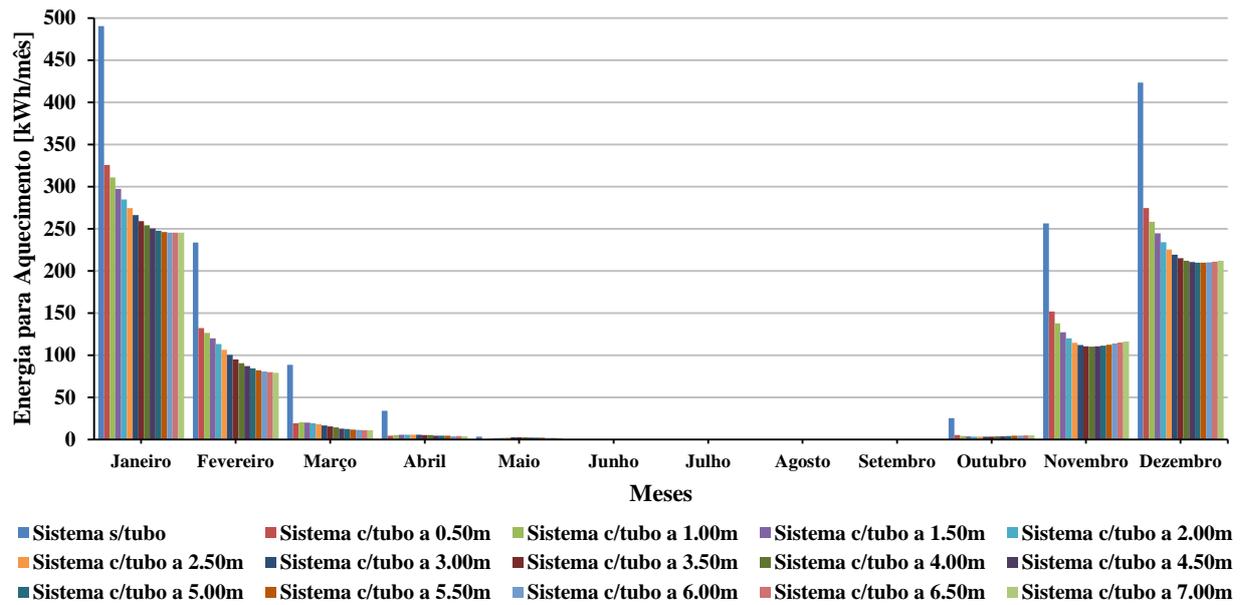


Figura 124 - Consumo mensal de energia para aquecimento, de acordo com a variação da profundidade do tubo de PVC

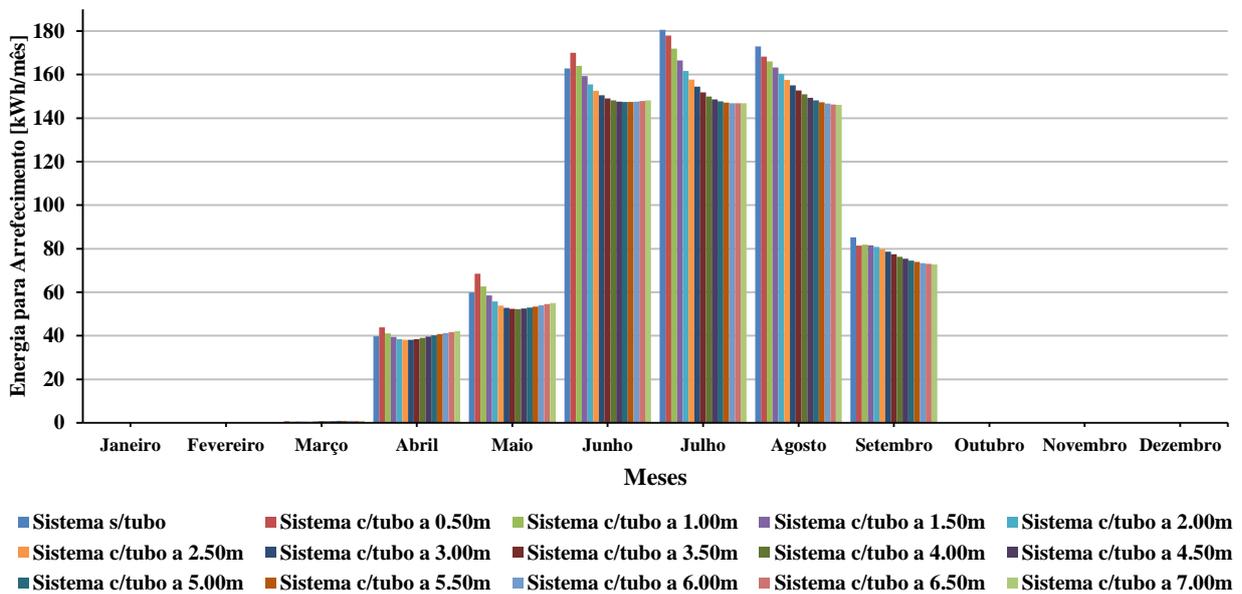


Figura 125 - Consumo mensal de energia para arrefecimento, de acordo com a variação da profundidade do tubo de PVC