

# **Utilização de Bombas de Calor Geotérmico no Aquecimento e Climatização da Academia Militar**

Aquartelamento da Amadora (um caso de estudo)

**Diogo Jorge Pereira Gonçalves**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia e Gestão da Energia**

Orientadores: Prof. José Manuel Vaz Velho Barbosa Marques

Dr. Rui Pedro da Costa Neto

Prof.<sup>a</sup> Paula Manuela dos Santos Lopes do Rego Figueiredo

## **Júri**

Presidente: Prof. Edgar Caetano Fernandes

Orientador: Dr. Rui Pedro da Costa Neto

Vogal: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

**Julho 2017**





## **Agradecimentos**

Aos meus orientadores Prof. Doutor. José Manuel Vaz Velho Barbosa Marques e Prof. Doutor. Rui Pedro da Costa Neto, pelo voto de confiança para integrar este projeto, pela disponibilidade, apoio, motivação e paciência ao longo desta jornada

Ao EME que financiou através do Cinamil o projecto GHAMA, no qual se insere esta dissertação, especialmente à Prof.<sup>a</sup> Doutora Paula Manuela dos Santos Lopes do Rego Figueiredo pela disponibilidade no fornecimento de dados indispensáveis para realização desta dissertação, e ao Sr. Hélder pela disponibilidade e apoio sempre que foi necessário visitar o aquartelamento da Amadora.

Ao meu primo Nuno pela amizade e apoio.

O meu agradecimento à minha Mãe, ao meu Pai e à minha irmã, a quem dedico este trabalho, pela confiança depositada em mim, por permitirem que realize os meus sonhos, e por serem a minha referência.

À Carina, obrigado pela compreensão, pelo carinho, paciência, incentivo, por seres o meu pilar ao longo deste trabalho e não me deixares desistir.



## Resumo

Esta dissertação estudou a viabilidade, numa fase conceptual, da utilização de um sistema de Bombas de Calor Geotérmico (BCG) para climatização do espaço útil do edifício dormitório do Aquartelamento Militar da Amadora, assim como para a preparação de Águas Quentes Sanitárias (AQS). O edifício tem capacidade para 78 alunos e uma área útil de 839 m<sup>2</sup>. Inicialmente foram avaliadas as cargas térmicas do edifício a serem substituídas por energia geotérmica, seguindo a metodologia presente no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e utilizando o *software RETScreen*. As quantidades estimadas de energia necessária para a preparação de AQS foram 46,36 MWh/ano, para o aquecimento do espaço 27,83 MWh/ano e para arrefecimento 25,76 MWh/ano.

Foi avaliada no dimensionamento, através do *software RETScreen*, a instalação de um sistema de Bombas de Calor Geotérmico de circuito fechado vertical (BCAS Vertical) e um sistema de Bombas de Calor de Água Subterrânea de circuito aberto (BCASub). Efetuou-se a comparação das tecnologias utilizadas no Aquartelamento da Amadora, uma caldeira a gás natural com COP=0,68 e o sistema de ar condicionado de EER=3,5, com o sistema de BCG a instalar considerando um COP=4. Após análise dos dois sistemas, o balanço financeiro obtido para um tempo de vida de projeto considerado de 15 anos obteve, respetivamente para o sistema BCAS Vertical e BCASub: um valor atual líquido (VAL) de 24.117 € e 32.450 €, uma taxa interna de retorno (TIR) de 18% e 34%, e um período de retorno (PR) de aproximadamente 5 e 3 anos.

**Palavras-chave:** *RETScreen*, bomba de calor geotérmico, climatização, balanço financeiro

## **Abstract**

This dissertation studied the feasibility of a Geothermal Heat Pump (GHP) system used for the climatization of the dormitory building at the Amadora's Campus of the Military Academy, as well as for the Domestic Hot Waters (DHW). The building has a capacity of 78 students and a floor area of 839 m<sup>2</sup>. Initially, the thermal loads of the building to be replaced by geothermal energy were evaluated, following the methodology presented in the Regulation of Energy Performance of Housing Buildings (REH) and using RETScreen software. The amount of energy required estimated for the DHW was 46.36 MWh/year, for space heating 27.83 MWh/year and space cooling 25.76 MWh/year.

The installation of a vertical closed circuit Geothermal Heat Pump system (Vertical GSHP) and an open circuit Groundwater Heat Pump system (GWHP) was evaluated through the RETScreen software. A comparison of the technologies used in the Amadora's Campus, a natural gas boiler with COP=0.68 and an air conditioning system with EER=3.5, was made with the GHP system to be installed with a COP=4. After analyzing the two systems, the financial results obtained for a project life of 15 years were respectively for the Vertical GSHP and GWHP systems a net present value (NPV) of € 24,117 and € 32,450, an internal rate of return (IRR) of 18% and 34%, and a return period (RP) of approximately 5 and 3 years.

**Keywords:** *RETScreen*, Ground Source Heat Pump, climatization, Balance sheet

## Índice

Agradecimentos.....	iv
Resumo .....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Tabelas .....	xi
Lista de Figuras .....	xiii
Lista de Acrónimos .....	xv
Lista de Caracteres Latinos.....	xvi
Lista de Caracteres Gregos.....	xviii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Objetivos da Dissertação.....	1
1.3. Descrição.....	2
2. Teoria Fundamental .....	3
2.1. Energia Geotérmica.....	3
2.1.1. Tipos de energia geotérmica e principais aplicações.....	3
2.2. Bomba de Calor.....	5
2.2.1. Ciclo de Bomba de Calor de Carnot.....	5
2.2.2. Limite do coeficiente de performance do ciclo .....	6
2.2.3. Desvios ao ciclo de Carnot.....	6
2.3. Bombas de Calor Geotérmico .....	9
2.3.1. Visão geral e os vários tipos de Bombas de Calor Geotérmico.....	9
2.3.2. Bombas de Calor Acopladas ao Solo.....	10
2.3.3. Bombas de Calor de Água Subterrânea .....	12
2.3.4. Bombas de Calor de Água Superficial .....	13
2.3.5. Fatores que influenciam a escolha do sistema de BCG .....	14
2.3.6. Tamanho ótimo do sistema de BCG a aplicar.....	16
2.3.7. Visão geral da plataforma de software RETScreen .....	17
3. Enquadramento do Caso de Estudo .....	18
3.1. Sistemas de BCG em Portugal.....	18



3.2.	Enquadramento Climático Regional .....	19
3.3.	Caracterização geológica do Município da Amadora.....	22
3.3.1.	Componente hidrogeológica do Município da Amadora .....	25
3.4.	Edifício da Academia Militar – Aquartelamento da Amadora .....	26
3.4.1.	Caracterização do edifício .....	28
3.4.2.	Envolvente exterior .....	29
3.4.3.	Envolvente Interior.....	31
3.4.4.	Transmissão térmica através da envolvente do edifício .....	32
4.	Demonstração e aplicação da metodologia .....	34
4.1.	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento ( $N_{ic}$ ) .....	34
4.1.1.	Cálculo da transferência de calor por transmissão através da envolvente ( $Q_{tr,i}$ ).....	35
4.1.2.	Cálculo da transferência de calor por renovação do ar ( $Q_{ve,i}$ ).....	40
4.1.3.	Cálculo dos ganhos térmicos úteis ( $Q_{gu,i}$ ).....	41
4.2.	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento ( $N_{vc}$ ) .....	44
4.2.1.	Cálculo da transferência de calor por transmissão através da envolvente ( $Q_{tr,v}$ ) .....	44
4.2.2.	Cálculo da transferência de calor por renovação do ar ( $Q_{ve,v}$ ).....	45
4.2.3.	Cálculo dos ganhos térmicos brutos ( $Q_{g,v}$ ).....	45
4.3.	Necessidades nominais anuais de energia térmica útil para a preparação de águas quentes sanitárias ( $Q_{AQS}$ ) .....	47
4.4.	Dimensionamento do sistema de Bomba de Calor Geotérmico (BCG).....	48
4.4.1.	Capacidade da bomba de calor.....	48
4.4.2.	Sistema de Permutador Geotérmico .....	52
5.	Balanço Financeiro, resultados .....	56
5.1.	Energia. Poupança anual .....	56
5.2.	Parâmetros Financeiros .....	57
5.3.	Discussão dos Resultados Obtidos.....	59
5.3.1.	Viabilidade económica.....	59
5.3.2.	Crítérios de decisão Financeira .....	60
5.3.3.	Impacto ambiental .....	61
5.3.4.	Comparação com outros estudos.....	61
6.	Conclusões .....	63

7. Bibliografia.....	65
Anexo 1 - Parâmetros térmicos necessários à obtenção do valor de transferência de calor por transmissão através da envolvente, segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013. ....	70
Anexo 2 – Envolvente Exterior do Edifício. ....	71
Anexo 3 – Envolvente Interior do edifício.....	73
Anexo 4 – Fator de utilização de ganhos, segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, 3 de Dezembro 2013. ....	74
Anexo 5 - Parâmetros necessários à obtenção do valor dos ganhos térmicos solares na estação de aquecimento, segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013.....	76
Anexo 6 - Parâmetros necessários à obtenção do valor dos ganhos térmicos solares na estação de arrefecimento, equação (4-20).....	78
Anexo 7 - Exemplo de unidades de bomba de calor geotérmico água-água, para aquecimento e produção de AQS.....	81
Anexo 8 - Características da Unidade água-água bomba de calor geotérmico, para aquecimento, produção de AQS, escolhida para o caso de estudo.....	82
Anexo 9 - Características do sistema geotérmico vertical, escolhido de acordo com o dimensionamento efetuado no caso de estudo. ....	83
Anexo 10 - Características do sistema geotérmico de água subterrânea, escolhido de acordo com o dimensionamento efetuado no caso de estudo.....	84
Anexo 11 - Metodologia para estimativa do número de alunos necessários para que a implementação dos sistemas geotérmicos considerados seja indiferente financeiramente, ou seja, o valor do VAL é zero.....	86

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Localização dos dados climáticos (RETscreen, 2015). .....	20
Tabela 2 - Temperaturas obtidas para o ar ambiente, graus dia de aquecimento e arrefecimento para os diferentes meses do ano na Amadora (RETscreen, 2015). .....	20
Tabela 3 – Tabela de propriedades térmicas das rochas características da região da Amadora a 25 °C (Colaço, 2015). .....	23
Tabela 4 – Descrição dos espaços da Planta dos Pisos 0,1 e 2 do edifício em estudo. ....	28
Tabela 5 -Áreas dos espaços a climatizar em cada Piso do Edifício. ....	29
Tabela 6 – Composição considerada para a parede dupla pertencente à envolvente exterior (Pina dos Santos & Matias, 2006; Pina dos Santos & Rodrigues, 2009). ....	30
Tabela 7 - Composição considerada para a cobertura do piso 2, pertencente à envolvente exterior (Pina dos Santos & Matias, 2006; Pina dos Santos & Rodrigues, 2009). ....	31
Tabela 8 - Composição considerada para o pavimento do piso 0, pertencente à envolvente exterior (Pina dos Santos & Matias, 2006; Pina dos Santos & Rodrigues, 2009). ....	31
Tabela 9 - Composição considerada para a parede pertencente à envolvente interior do edifício (Pina dos Santos & Matias, 2006). ....	32
Tabela 10 – Coeficientes de transmissão térmica calculados, para os diferentes elementos da envolvente. ....	33
Tabela 11 – Cálculo da primeira parcela da equação (4-4). ....	37
Tabela 12 - Pontes térmicas lineares das envolventes exteriores consideradas para os diferentes Pisos. ....	37
Tabela 13 – Valores obtidos nas alíneas a), b) e c), dos coeficientes de transferência de calor necessários para o cálculo da equação (4-3). ....	40
Tabela 14 – Termos calculados, necessários para a obtenção de $N_{ic}$ . ....	43
Tabela 15 - Parâmetros necessário para utilização do software RETscreen .....	49
Tabela 16 – Parâmetros de dimensionamento necessários definir para utilização do software RETScreen. ....	50
Tabela 17 – Balanço de carga do edifício e energia útil obtido. ....	51
Tabela 18 – Características de fábrica do aparelho água-água de BCG da Ecoforest, comercializada na península Ibérica (CYPE Ingenieros, S.A., 2016), especificação detalhada no Anexo 8. ....	52
Tabela 19 - Parâmetros necessários inserir para utilização do software RETscreen. ....	53
Tabela 20 – Características dos parâmetros específicos para os dois tipos de sistema de permutador geotérmico considerados para o caso de estudo. ....	54
Tabela 21 – Principais parâmetros de dimensionamento obtidos no software RETScreen para os dois sistemas considerados. ....	55
Tabela 22 – Custo da energia, em €, para as diferentes tecnologias consideradas no caso de estudo. ....	57
Tabela 23 - Parâmetro económicos comuns, considerados para o caso de estudo. ....	58



## Lista de Figuras

Figura 1 - Principais aplicações da energia geotérmica em função da temperatura (AI Energia, 2017)	4
Figura 2 – Ciclo de Bomba de Calor de Carnot e respetivo diagrama T-s à direita (Moran & Shapiro, 2010).....	5
Figura 3 – Sistema que percorre um ciclo de Bomba de Calor enquanto troca energia por transferência de calor com dois reservatórios térmicos (Moran & Shapiro, 2010). ....	6
Figura 4 - Comparação do diagrama T-s do ciclo de Carnot à esquerda, com o diagrama de um ciclo com a temperatura do refrigerante no evaporador $T'_H$ e no condensador $T'_C$ , à direita (Moran & Shapiro, 2010) .....	7
Figura 5 - Ciclo de Bomba de Calor de um sistema real e respetivo diagrama T-s à direita (Moran & Shapiro, 2010) .....	7
Figura 6 – Esquema de uma unidade de bomba de calor geotérmico, com modo de aquecimento e arrefecimento do edifício (Moran & Shapiro, 2010) .....	10
Figura 7 - Bomba de Calor Geotérmico de Circuito fechado com três opções de circuito (Kavanaugh & Rafferty, 2014) .....	11
Figura 8 - Bomba de calor de água subterrânea, ou de circuito aberto (Kavanaugh & Rafferty, 2014)	13
Figura 9 – Bomba de calor superficial de circuito fechado, com duas opções permutador (Kavanaugh & Rafferty, 2014) .....	14
Figura 10 - Classificação climática de Köppen aplicada à Península Ibérica, adaptado do Atlas Climático Ibérico de 2011 produzido pela Agência Estatal de Meteorologia em cooperação com o Instituto de Meteorologia. ....	19
Figura 11 - Evolução da temperatura média anual no Município da Amadora entre 1915 e 2012 (Fonte: Câmara Municipal da Amadora, Serviço Municipal de Proteção Civil, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, TERCUD - Centro de Estudos do Território, Cultura e Desenvolvimento, 2013).....	21
Figura 12 - Carta Geológica do Município da Amadora (Crucho & Costa, 2013) .....	24
Figura 13 – Edifício em estudo delimitado a amarelo, localização dos poços de captação existentes na Academia Militar - Aquartelamento da Amadora, representados por (●): locais de amostragem ...	25
Figura 14 – Campus da Academia Militar - Aquartelamento da Amadora, delimitado a amarelo com 85 hectares de área.....	26
Figura 15 - Edifício escolhido para o caso de estudo, representado na 3ª vinheta da figura.....	27
Figura 16 – Vista tridimensional do edifício a climatizar. ....	27
Figura 17 - Planta do Piso 0, equivalente no Piso 1 e 2. Áreas úteis a climatizar a vermelho. Figura adaptada da planta do projeto de execução do edifício do alojamento de alunos da Academia Militar destacamento da Amadora. ....	28
Figura 18 - Planta do Piso 0, equivalente no Piso 1 e 2. Parede pertencente à envolvente exterior do espaço a climatizar (representada a vermelho), e envidraçados (representados a azul claro). Figura adaptada da planta do projeto de execução do edifício do alojamento de alunos da Academia Militar destacamento da Amadora. ....	30

Figura 19 - Planta do Piso 0, equivalente no Piso 1 e 2. Parede pertencente à envolvente interior do espaço a climatizar (representada a azul escuro). Figura adaptada da planta do projeto de execução do edifício do alojamento de alunos da Academia Militar destacamento da Amadora. ....	32
Figura 20 - Planta do Piso 0, equivalente no Piso 1 e 2. Representação das pontes térmicas lineares consideradas, pertencentes à envolvente exterior. Paredes Verticais (destacadas com um círculo verde), e Fachadas com Pavimentos (representadas a cor de laranja, medidas em metros). Figura adaptada da planta do projeto de execução do edifício do alojamento de alunos da Academia Militar destacamento da Amadora. ....	38
Figura 21 - Comportamento da carga térmica de aquecimento e arrefecimento, do caso de estudo. .	51
Figura 22 – Evolução do Cash Flow acumulado [€] ao longo do período de projecto [15 anos]. ....	59
Figura 23 – Evolução do VAL para os sistemas geotérmico vertical e de água subterrânea em função da Taxa.....	60

## **Lista de Acrónimos**

**AQS** Águas Quentes Sanitárias

**AVAC** Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

**BCAS** Bomba de calor acoplada ao solo

**BCASub** Bomba de calor de água subterrânea

**BCASup** Bomba de calor de água superficial

**BCAS-XD** Bomba de calor acoplada ao solo de expansão direta

**BCG** Bomba de calor geotérmico

**COP** Coeficiente de Performance

**CVL** Complexo Vulcânico de Lisboa

**LNEC** Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**PEAD** Polietileno de Alta Densidade

**PR** Período de Retorno

**REH** Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

**TIR** Taxa Interna de retorno

**UE** União Europeia

**VAL** Valor Atual Líquido

**XD** Expansão Direta

## Lista de Caracteres Latinos

$A_i$  – Área do elemento  $i$  da envolvente medida na parte interior do edifício [ $m^2$ ]

$A_{op}$  - Área do elemento da envolvente opaca exterior [ $m^2$ ]

$A_p$  - Área interior útil de pavimento do edifício [ $m^2$ ]

$A_{s,inj}$  - Área efetiva coletora de radiação solar da superfície envidraçada “ $n$ ” com orientação “ $j$ ”, na estação de aquecimento [ $m^2$ ]

$A_{s,vnj}$  - Área efetiva coletora de radiação solar da superfície envidraçada “ $n$ ” com orientação “ $j$ ”, na estação de arrefecimento [ $m^2$ ]

$A_w$  - Área total do vão envidraçado, incluindo o vidro e caixilho [ $m^2$ ]

$B_j$  - Desenvolvimento linear da ponte térmica linear  $j$ , medido pela parte interior do edifício [ $m$ ]

$b_{tr}$  - Coeficiente de redução de perdas de determinado espaço não útil ou edifício adjacente [-]

$CF_k$  - Cash flow durante o período  $k$

$e$  - Espessura do material [ $m$ ]

$f_{eh}$  - Fator de eficiência hídrica [-]

$F_g$  - Fração envidraçada do vão envidraçado [-]

$F_{s,inj}$  - Fator de obstrução da superfície envidraçada “ $n$ ” com orientação “ $j$ ”, na estação de aquecimento [-]

$F_{s,vnj}$  - Fator de obstrução da superfície envidraçada “ $n$ ” com orientação “ $j$ ”, na estação de arrefecimento [-]

$F_w$  – Fator de redução dos ganhos solares [-]

$GD$  - Graus-dias de aquecimento [ $^{\circ}C.dia$ ]

$G_{sul}$  - Energia solar média na estação de aquecimento, que incide numa superfície vertical orientada a Sul [ $kWh/m^2.mês$ ]

$g_{vi}$  - Fator solar do vidro [-]

$g_{\perp,vi}$  - Fator solar do vidro, para uma incidência solar normal à superfície [-]

$H_{adj}$  - Coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contacto com edifícios adjacentes [ $W/^{\circ}C$ ]

$H_{ecs}$  - Coeficiente de transferência de calor através dos elementos em contacto com o solo [ $W/^{\circ}C$ ]

$H_{enu}$  - Coeficiente de transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com espaços não úteis [ $W/^{\circ}C$ ]



**H<sub>ext</sub>** - Coeficiente de transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com o exterior [W/°C]

**H<sub>tr,i</sub>** - Coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento [W/°C]

**H<sub>tr,v</sub>** - Coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de arrefecimento [W/°C]

**H<sub>ve,i</sub>** - Coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento [W/°C]

**H<sub>ve,v</sub>** - Coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento [W/°C]

**I<sub>sol,j</sub>** - Energia solar acumulada na com orientação “j” durante toda a estação de arrefecimento [kWh/m<sup>2</sup>]

**L<sub>v</sub>** - Duração da estação de arrefecimento [horas]

**M** - Duração média da estação convencional de aquecimento [mês]

**M<sub>AQS</sub>** – Consumo médio diário de referência, de Águas Quentes Sanitárias [Litros]

**N<sub>ic</sub>** - Necessidade nominal anual de energia útil para aquecimento [kWh/m<sup>2</sup>.ano]

**N<sub>vc</sub>** - Necessidade nominal anual de energia útil para arrefecimento [kWh/m<sup>2</sup>.ano]

**P<sub>d</sub>** - Pé direito do piso [m]

**P<sub>j</sub>** - Desenvolvimento total da parede em contacto com o solo j, medido pelo interior do edifício [m]

**Q<sub>AQS</sub>** - Energia térmica útil para a preparação Águas Quentes Sanitárias [MWh/ano]

**Q<sub>g,i</sub>** - Ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento [kWh]

**Q<sub>g,v</sub>** - Ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento [kWh]

**Q<sub>g,v</sub>** - Ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento [kWh]

**Q<sub>gu</sub>** - Ganho térmico útil resultante da radiação solar através dos vãos envidraçados [kWh]

**q<sub>int</sub>** - Ganhos térmicos internos médios [W/m<sup>2</sup>]

**Q<sub>int,i</sub>** - Ganhos térmicos associados às várias fontes de calor internas na estação de aquecimento [kWh]

**Q<sub>int,v</sub>** - Ganhos térmicos associados às várias fontes de calor internas na estação de arrefecimento [kWh]

**Q<sub>sol,i</sub>** - Ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos diferentes vãos envidraçados na estação de aquecimento [kWh]

**Q<sub>sol,v</sub>** - Ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos diferentes vãos envidraçados na estação de arrefecimento [kWh]

**Q<sub>tr,i</sub>** - Transferência de calor por transmissão através da envolvente na estação de aquecimento [kWh]

**Q<sub>tr,v</sub>** - Transferência de calor por transmissão através da envolvente na estação de arrefecimento [kWh]

**Q<sub>ve,i</sub>** - Transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento [kWh]

$Q_{ve,v}$  - Transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento [kWh]

$r$  - Taxa de juro da dívida

$R_f$  - Resistência térmica do pavimento em contacto com o solo, com exclusão das resistências térmicas superficiais interiores,  $R_{si}$ , e exterior,  $R_{se}$  [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

$R_j$  - Resistência térmica da camada  $j$  [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

$R_{ph}$  - Taxa nominal de renovação do ar interior na estação de aquecimento [ $h^{-1}$ ]

$R_{se}$  - Resistência térmica superficial exterior  $m^2 \cdot ^\circ C/W$

$R_{si}$  - Resistência térmica superficial interior [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

$U$  - Coeficiente de transmissão térmica [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$U_{bf,i}$  - Coeficiente de transmissão térmica do pavimento enterrado  $i$  [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$U_{bw,j}$  - Coeficiente de transmissão térmica da parede em contacto com o solo  $j$  [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$X_j$  - Fator de orientação para as diferentes exposições [-]

$z_j$  - Profundidade média enterrada da parede em contacto com o solo  $j$  [m]

### **Lista de Caracteres Gregos**

$\alpha$  - Coeficiente de absorção de radiação solar da superfície dos elementos da envolvente exterior opaca [-]

$\eta_i$  - Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento [-]

$\eta_v$  - Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento [-]

$\theta_{v,ext}$  - Temperatura média do ar exterior na estação de arrefecimento [ $^\circ C$ ]

$\theta_{v,ref}$  - Temperatura de referência para o cálculo das necessidades de energia na estação de arrefecimento [ $^\circ C$ ]

$\lambda$  - Condutibilidade do material [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]

$\psi_j$  - Coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear  $j$  [ $W/(m \cdot ^\circ C)$ ]



## **1. Introdução**

A Academia Militar é um estabelecimento militar de ensino superior universitário que desenvolve atividades de ensino, de investigação e de apoio à comunidade, com a finalidade essencial de formar oficiais destinados aos quadros permanentes das armas e serviços do Exército e da Guarda Nacional Republicana.

Atualmente a Academia Militar integra a fundação das universidades Portuguesas e é, através do seu centro de investigação, o centro coordenador das atividades de investigação e desenvolvimento do Exército. (Academia Militar, 2016)

O Aquartelamento Militar da Amadora serve como caso de estudo para a realização desta dissertação.

### **1.1. Motivação**

Este projeto surge de forma a colmatar duas necessidades do ponto de vista energético: a primeira refere-se à substituição do sistema existente e que é ineficiente para aquecer e climatizar as instalações do Aquartelamento Militar da Amadora; a segunda refere-se à utilização de uma fonte de energia renovável fundamental para contribuir com a execução dos planos/metastas da comunidade europeia propostos para aumentar a eficiência energética em 20% até 2020 assim como a redução das emissões de CO<sub>2</sub> em 20 % (Schibuola & Scarpa, 2016).

A escolha da Bomba de Calor Geotérmico não é feita ao acaso. Este tipo sistema de energia renovável térmica tem sido utilizado nos últimos anos em grandes postos de exército nos Estados Unidos da América, como o de Fort Nox e o de Aberdeen, dando mostras de melhoramento da qualidade de vida assim como a redução das despesas de consumo de Energia (U.S. Department of Energy, 2015).

### **1.2. Objetivos da Dissertação**

Esta dissertação foca-se na investigação das instalações superficiais existentes e a sua capacidade para suportar uma intervenção geotérmica, mais precisamente um edifício que funciona como dormitório no Aquartelamento Militar da Amadora, avaliando as cargas térmicas que podem ser suprimidas por energia geotérmica. Uma maior importância tem o estudo da viabilidade dos cenários mais adequados que foram considerados, para uma fase conceptual de uma instalação geotérmica piloto. O estudo de viabilidade, para além de avaliar as tecnologias mais favoráveis, avalia também as necessidades de investimento, a facilidade de exploração e construção, assim como os indicadores económicos mais importantes na avaliação típica de um projeto, como o valor atual líquido (VAL), taxa interna de retorno (TIR), e período de retorno (PR).

Sendo assim é possível apresentar os principais objetivos do projeto:

- Demonstrar o potencial do recurso geotérmico de baixa temperatura, existente, para maximizar a eficiência energética do edifício escolhido no seu aquecimento e arrefecimento.

- Dimensionamento do sistema de Bomba de Calor Geotérmico numa fase conceptual e avaliar de um ponto de vista económico a viabilidade da aplicação do sistema, em comparação com as tecnologias tradicionais utilizadas.
- Tornar esta dissertação de mestrado uma referência demonstrativa, na instalação do mesmo tipo de tecnologias em restantes instalações militares Portuguesas.

### **1.3. Descrição**

De modo a concretizar os objetivos referidos anteriormente é possível descrever o trabalho desenvolvido nesta dissertação em 6 capítulos.

No Capítulo 1 referente à introdução, é apresentado de uma forma resumida o objetivo da dissertação, a motivação e as razões para a sua realização.

O capítulo 2 é onde é apresentada a teoria fundamental da tecnologia da Bomba de Calor Geotérmico, o seu funcionamento, em que o solo é utilizado como fonte de energia térmica para a climatização de um espaço. Neste capítulo é introduzido o coeficiente de performance (COP), essencial para o conceito de eficiência energética. Neste capítulo é apresentado também a história da aplicação do sistema de Bombas de Calor Geotérmico, e a utilização do *software RETscreen* como ferramenta de dimensionamento de um projeto numa fase conceptual.

No capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica relativamente à história dos sistemas utilizados no território português, a apresentação das condições geográficas da região onde está localizado o Quartelamento Militar da Amadora, e descrição das características essenciais do edifício dormitório que funciona como caso de estudo desta dissertação.

O capítulo 4 descreve a metodologia e demonstra a obtenção das cargas térmicas do edifício, por forma a solucionar a avaliação da viabilidade da aplicação do sistema de Bomba de Calor Geotérmico.

O capítulo 5 descreve o balanço financeiro do sistema de Bomba de Calor Geotérmico, adequado de acordo com o capítulo anterior, assim como, a discussão dos resultados obtidos.

Por fim o capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas no trabalho efetuado, assim como, uma perspetiva de futuros desenvolvimentos ou ideias não aprofundadas nesta dissertação. Como forma de complemento ao entendimento da dissertação estão incluídos no final alguns anexos.

## **2. Teoria Fundamental**

### **2.1. Energia Geotérmica**

A superfície da Terra é formada por grandes placas tectónicas (Crusta Terrestre) que mantêm a superfície Terrestre isolada do manto, que consiste basicamente em rochas fundidas. Com o aumento da profundidade a temperatura no interior da Crusta Terrestre aumenta cada vez mais (i.e. existe gradiente geotérmico). No entanto, há zonas de intrusões magmáticas onde a temperatura próximo da superfície Terrestre é anormalmente elevada. Essas são as zonas onde há elevado potencial geotérmico (Portal Energia, 2016).

#### **2.1.1. Tipos de energia geotérmica e principais aplicações**

A energia geotérmica pode ser classificada dependendo da entalpia do fluido que efetua a transferência de calor das rochas mais profundas para a superfície. O recurso é então dividido em energia geotérmica de:

- Alta entalpia (temperatura superior a 150 °C)
- Média entalpia (temperatura entre 90 °C e 150 °C)
- Baixa entalpia (temperatura entre 30 °C e 90 °C)
- Muito baixa entalpia (temperatura inferior a 30 °C)

A Figura 1 demonstra as principais aplicações do calor terrestre em função da entalpia. Para o propósito de utilização de Bombas de Calor Geotérmico, as gamas de temperaturas a utilizar são aquelas abaixo dos 40 °C, que corresponde à energia geotérmica de baixa ou muito baixa entalpia. A energia térmica extraída do solo pode ser aplicada a distintas atividades da sociedade.

#### **Energia Geotérmica de Baixa Entalpia**

Os sistemas de aproveitamento geotérmico tradicional envolvem a exploração da Terra a grandes profundidades, onde as temperaturas são muito elevadas e é possível produzir energia elétrica. Contudo, estes sistemas são dispendiosos e a tecnologia envolvida só é justificada para projetos de grande dimensão (Preene & Powrie, 2009; Moel, 2010).

O sector dos edifícios representa cerca de 40% do consumo de energia final e 36% das emissões totais de gases de efeito de estufa na União Europeia (UE), e devido ao elevado potencial em poupança de energia, é considerado um sector chave para o cumprimento das metas propostas pela UE. A maior parte do consumo de energia final nos edifícios, cerca de 67% nos residenciais da UE, é para aquecimento. Dois terços do calor fornecido são gerados por combustíveis fósseis, maioritariamente por caldeiras de gás natural. (Carvalho et al., 2015).

O subsolo, mesmo a baixas profundidades, revela ser uma fonte de energia térmica muito estável, que pode ser aproveitada para benefício do conforto térmico do ser humano. É neste domínio que se encaixa a energia geotérmica de muito baixa entalpia ( Moel, 2010).

A Europa, na sua grande maioria, apresenta solos com temperaturas aproximadamente constantes a profundidades entre os 10 m e os 15 m. A pouco mais de 50 m os valores rondam entre os 10°C e os 15°C. São temperaturas que, do ponto de vista da eficiência energética, podem ser utilizadas para a climatização dos edifícios, através da utilização de uma Bomba de Calor Geotérmico. O maior benefício das Bombas de Calor Geotérmico deve-se ao facto de serem muito mais eficientes que os sistemas de climatização tradicionais, devido a estabilidade térmica do solo. As seguintes secções aprofundam melhor o funcionamento dos sistemas de Bombas de Calor (U.S. Department of Energy, 2015).

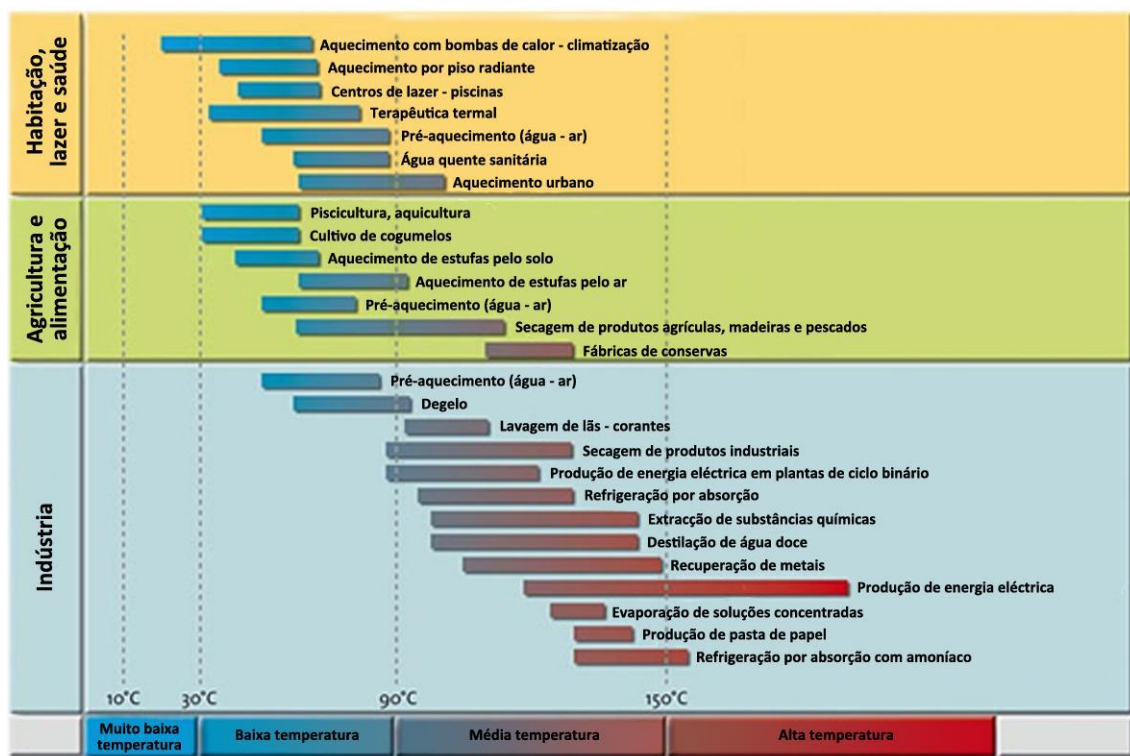


Figura 1 - Principais aplicações da energia geotérmica em função da temperatura (AI Energia, 2017)

## 2.2. Bomba de Calor

Uma Bomba de Calor é utilizada essencialmente para manter a temperatura dentro de um edifício acima da temperatura de vizinhança. Para compreender um sistema de Bomba de Calor basta olhar para o ciclo de Carnot reversível, visto que têm características em comum, sendo que a diferença está no ponto de vista pois o objetivo de um sistema de refrigeração é manter uma região fria a uma temperatura inferior à da sua vizinhança (Moran & Shapiro, 2010).

### 2.2.1. Ciclos de Bomba de Calor de Carnot

O ciclo de Bomba de Calor a vapor de Carnot, representado na Figura 2, opera entre uma região  $T_C$  e uma região a uma temperatura mais elevada  $T_H$  funcionando assim como reservatório térmico frio e quente, respetivamente, segundo os enunciados da segunda lei da termodinâmica. O ciclo é obtido invertendo o ciclo de potência a vapor de Carnot, onde o fluido refrigerante, ou de trabalho, circula através dos vários equipamentos com processos reversíveis, alternando entre o estado líquido e de vapor.

Partindo do ponto 1 da Figura 2 o fluido de trabalho encontra-se no estado líquido-vapor, havendo uma maior quantidade no estado de vapor. O fluido de trabalho é comprimido adiabaticamente (sem troca de calor com a vizinhança) no compressor para o ponto 2, estado de vapor saturado, para uma pressão mais elevada e temperatura  $T_H$ . De seguida o fluido percorre o condensador onde ocorre transferência de calor para o reservatório à temperatura  $T_H$ , e o ponto 3 fica no estado líquido saturado à mesma temperatura e pressão do ponto anterior. Não existindo diferença de temperatura entre o fluido e o reservatório térmico, o processo é considerado isotérmico, não existem irreversibilidades externas na transferência de calor. Posteriormente ao percorrer a turbina o fluido expande adiabaticamente para o ponto 4, estado líquido-vapor maioritariamente líquido, para uma pressão menor e temperatura  $T_C$ . Finalmente o fluido passa através do evaporador, a pressão constante, onde ocorre transferência de calor do reservatório  $T_C$  para o fluido, deixando-o nas condições enunciadas inicialmente no ponto 1.

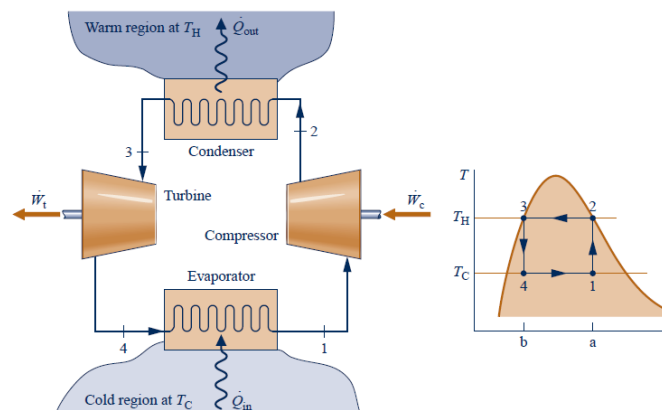


Figura 2 – Ciclo de Bomba de Calor de Carnot e respetivo diagrama T-s à direita (Moran & Shapiro, 2010).



### 2.2.2 Limite do coeficiente de performance do ciclo

Uma limitação no desempenho de ciclos de Bomba de Calor é colocada e demonstrada recorrendo ao esquema utilizado no enunciado de Kelvin-Planck da segunda lei da termodinâmica. Observando a Figura 3, a qual representa um sistema que percorre um ciclo de Bomba de Calor, enquanto comunica termicamente com um reservatório frio e outro quente. As setas da figura indicam o sentido da transferência de energia. O objetivo deste ciclo de Bomba de Calor é descarregar energia  $Q_H$  para o reservatório quente por transferência de calor igual à soma da energia recebida,  $Q_C$  por transferência de calor do reservatório frio e  $W_{ciclo}$  que representa a energia sob a forma de trabalho que entra no ciclo. O trabalho que entra no ciclo não pode ser nulo, de forma a não violar o enunciado de Clausius da segunda lei da termodinâmica (Moran & Shapiro, 2010).

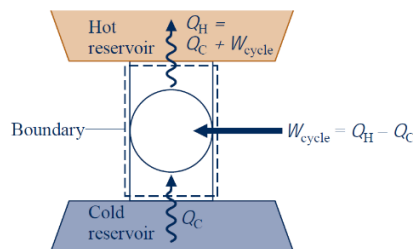


Figura 3 – Sistema que percorre um ciclo de Bomba de Calor enquanto troca energia por transferência de calor com dois reservatórios térmicos (Moran & Shapiro, 2010).

Definindo o coeficiente de performance (COP) de um ciclo de Bomba de Calor como, a razão entre a quantidade de calor  $Q_H$  transferida para aquecimento do reservatório quente e o trabalho líquido necessário para cumprir esse objetivo. O coeficiente de performance fica:

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{W_{ciclo}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} \quad (2-1)$$

### 2.2.3. Desvios ao ciclo de Carnot

É possível encontrar pelo menos três razões que provocam desvios significativos nos sistemas de Bomba de Calor reais, relativamente ao ciclo de Carnot da Figura 2.

Um dos desvios mais significativos é causado nas transferências de calor que ocorrem entre o refrigerante que percorre o ciclo e as duas regiões térmicas, em sistemas reais não são reversíveis como referido anteriormente no ciclo de Carnot da Figura 2. Especificando, para obter uma taxa de transferência de calor suficiente para manter a região quente a uma temperatura  $T_H$ , utilizando um condensador dimensionado de uma forma prática, a temperatura do fluido refrigerante no condensador deve estar vários graus acima de  $T_H$  ficando à temperatura de  $T'_H$ , como se pode observar no diagrama da direita da Figura 4. O mesmo acontece para a região fria à temperatura  $T_C$ , esta deve ser vários graus acima da temperatura do refrigerante que circula no evaporador, com a temperatura  $T'_C$ .

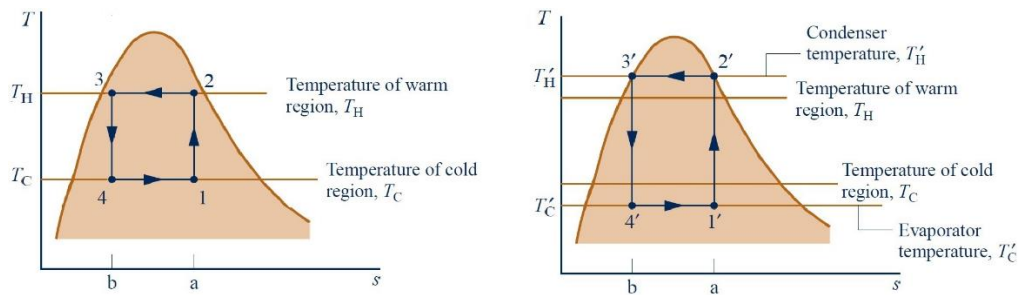


Figura 4 - Comparação do diagrama T-s do ciclo de Carnot à esquerda, com o diagrama de um ciclo com a temperatura do refrigerante no evaporador  $T'_H$  e no condensador  $T'_C$ , à direita (Moran & Shapiro, 2010)

Fazendo a comparação do diagrama T-s do ciclo de Carnot à esquerda na Figura 4, com o diagrama do ciclo à direita, é possível verificar que as áreas correspondentes às transferências de calor do diagrama da direita são maiores, isto faz com que o coeficiente de performance deste último diminua relativamente ao máximo de Carnot.

Outro desvio ao ciclo de Carnot da Figura 2, que o torna impraticável em sistemas reais, está relacionado com o processo de compressão do refrigerante do estado 1 para o 2. Este processo em sistemas reais não é reversível, ou seja, existe sempre produção de entropia, como pode ser observado no diagrama T-s da Figura 5, o processo de 1 para 2 segue o caminho a tracejado. Para além das irreversibilidades internas ocorridas este processo não pode ocorrer quando o fluido refrigerante se encontra no estado líquido-vapor, pois qualquer gota de líquido danifica o compressor, devendo assim a compressão do fluido ser toda no estado de vapor, ou seja, o ponto 1 encontra-se no estado sobreaquecido representado na Figura 5.

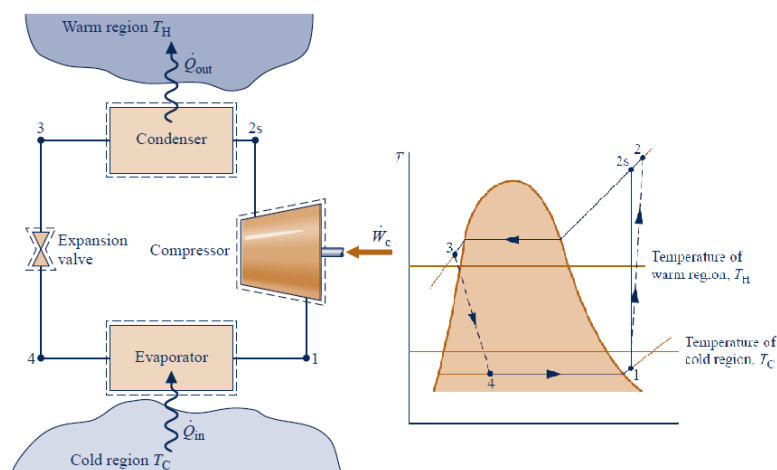


Figura 5 - Ciclo de Bomba de Calor de um sistema real e respetivo diagrama T-s à direita (Moran & Shapiro, 2010)

Finalmente outra característica que torna o ciclo da Figura 2 impraticável, está relacionada com o processo de expansão realizado pela turbina. O trabalho produzido na expansão do refrigerante é consideravelmente menor que o trabalho que é necessário fornecer ao compressor. Uma Turbina real que efetue uma expansão de um líquido saturado até um estado de líquido-vapor, tipicamente as

eficiências são baixas. Sendo assim é possível substituir a turbina por uma válvula de expansão, como representado na Figura 5, possibilitando assim uma poupança em custo iniciais e de manutenção (Moran & Shapiro, 2010).

Como referido anteriormente o aumento do consumo de energia a nível mundial, possibilita nos dias de hoje utilizar Bombas de Calor no aquecimento e arrefecimento de espaços, assim como para produção de águas quentes nos edifícios. Geralmente as Bombas de Calor podem ser divididas em duas categorias: Bomba de Calor de Ar e Bomba de Calor Geotérmico. A Bomba de Calor de Ar utiliza o ar ambiente como evaporador/condensador para fornecer aquecimento ou arrefecimento no edifício. Uma vez que a temperatura ambiente pode variar bastante a eficiência neste tipo de Bombas de Calor também varia. Este é um problema quando se pretende aplicar este sistema em climas frios por exemplo. Alternativamente, as Bombas de Calor Geotérmico utilizam o solo como fonte de calor para se sobrepor às eficiências obtidas com as Bombas de Calor de Ar (Hakkaki-Fard et al., 2014).

A seguinte secção aprofunda os diferentes sistemas de Bombas de Calor Geotérmico, as diferentes características e vantagens.

## **2.3. Bombas de Calor Geotérmico**

### **2.3.1. Visão geral e os vários tipos de Bombas de Calor Geotérmico**

Bombas de Calor Geotérmico (BCG) é um termo utilizado para uma grande variedade de sistemas que utiliza o solo, água subterrânea, ou água superficial como fonte de calor ou dissipador de calor. As BCG são subdivididas pelo tipo de sistema de permutador de calor externo, ou geotérmico, que possuem. Isso inclui as Bombas de Calor Acopladas ao solo (BCAS) em que os permutadores são um sistema de tubagem com circuito fechado enterrado no solo, Bombas de Calor de Água Subterrânea (BCASub) que são sistemas de tubagem de circuito aberto com poços de água, e por fim Bombas de Calor de Águas Superficiais (BCASup) que são sistemas de tubagem enrolada em bobine em circuito fechado ou sistemas de tubagem em circuito aberto ligadas a lagos, ou outro tipo de reservatórios.

A aplicação das BCG abrange maioritariamente edifícios residenciais, no entanto são cada vez mais utilizadas nos sectores comerciais e institucionais. Isto acontece porque, do ponto de vista económico para grandes edifícios as BCG não necessitam de equipamentos de controlo muito elaborados para fornecer conforto e eficiências elevadas. A utilização de abordagens simples no projeto faz com que o custo adicional no permutador de calor geotérmico seja compensado em grande parte, como têm também a vantagem de reduzir os requisitos de manutenção necessários. Sendo assim, as BCG podem ser bastante atrativas para edifícios com poucos recursos para manutenção como por exemplo edifícios escolares, academias etc. Contudo a simples ligação de um permutador de calor geotérmico, qualquer que seja o tipo de BCG, a um sistema convencional de AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) arrefecido a água, resulta num aumento nos custos de instalação, uma baixa eficiência e maiores requisitos de manutenção (Soni et al., 2015).

Para qualquer que seja o tipo de BCG utilizada, a unidade de Bomba de Calor pode ser demonstrada através do esquema representado na Figura 6. A unidade mais largamente utilizada é a Bomba de Calor água-ar. Observando o esquema da Figura 6, a água proveniente do circuito geotérmico instalado percorre o permutador do lado esquerdo da figura de forma que a transferência de calor com o líquido refrigerante utilizado no ciclo termodinâmico ocorra. Para aquecer ou refrigerar o ar do edifício, este é forçado a circular através do permutador do lado direito da Figura 6. Unidades de Bomba de Calor de pequena e média dimensão, são tipicamente mais eficientes comparando com unidades maiores, devido aos baixos requisitos de potência da ventoinha utilizada para fazer circular o ar, pois as ventoinhas de maior dimensão possuem uma maior pressão estática total de forma a conseguir efetuar a circulação do ar numa rede de distribuição mais extensa (Kavanaugh & Rafferty, 2014).

A unidade de Bomba de Calor água-água também tem uma utilização comum e é especialmente eficaz quando o circuito de água do edifício não pretende atingir temperaturas extremas. No entanto, se for esse o objetivo, é necessário associar uma caldeira à instalação. Esta unidade é ideal para a produção de águas quentes sanitárias, no entanto boas eficiências também são obtidas se o circuito de água do edifício utilizar unidades de ventilação de baixa pressão estática para climatização (Kavanaugh & Rafferty, 2014).

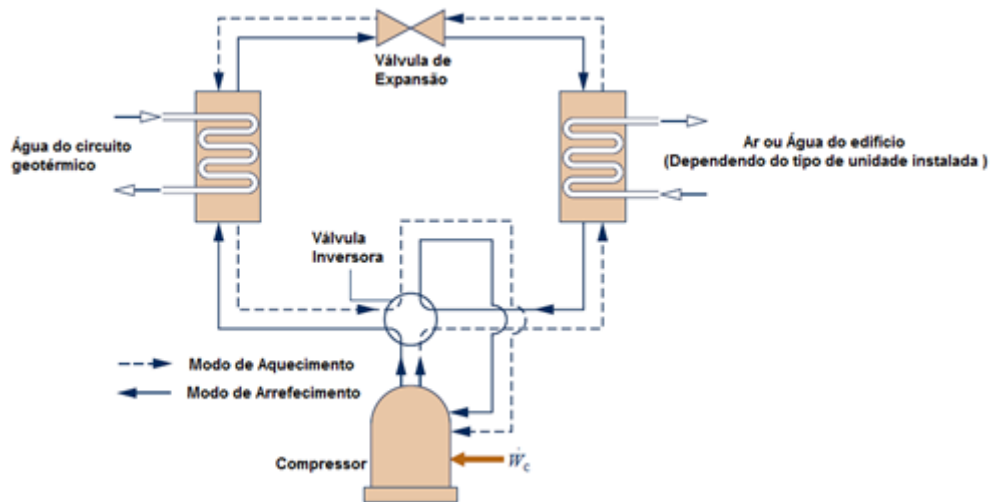


Figura 6 – Esquema de uma unidade de bomba de calor geotérmico, com modo de aquecimento e arrefecimento do edifício (Moran & Shapiro, 2010)

As unidades de BCG referidas anteriormente pertencem à mesma categoria, do ponto de vista que utilizam a água ou uma solução anticongelante, como fluido intermediário para conseguir transferir a energia sob a forma de calor do solo para o permutador da Bomba de Calor. Existe, no entanto, outra categoria de BCAS, chamada de expansão direta (XD), onde o líquido refrigerante circula num circuito fechado de tubos de cobre enterrados no solo. Desta forma a tubagem enterrada no solo funciona como evaporador/condensador do ciclo termodinâmico. Ao eliminar o permutador de calor intermediário, a temperatura do refrigerante na BCAS-XD, está mais próxima da temperatura do solo, o que faz com que a razão de compressão requerida seja menor. Sendo assim, o tamanho do compressor requerido é menor assim como o consumo de energia associado (Hakkaki-Fard et al., 2014).

Devido à eliminação do circuito secundário, as BCAS-XD oferecem algumas vantagens relativamente as BCG ditas mais usuais, ou seja, que utilizam um circuito secundário. As vantagens incluem, uma maior eficiência energética, baixo custo inicial assim como baixo custo de funcionamento. No entanto o dimensionamento do sistema tem de ser cuidadoso, pois podem ocorrer complicações como, a corrosão do tubo de cobre devido à propriedade ácida do solo provocando fuga do líquido refrigerante e colocando em risco o ambiente. O sistema de dimensionamento deste tipo de BCG não está ainda muito bem documentado (Guo et al., 2015).

Recentemente de forma a evitar preocupações ambientais, foram efetuados estudos de sistemas de BCG-XD que utilizam refrigerantes naturais, em particular dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), aproveitando as suas propriedades termodinâmicas superiores, boa transferência de calor e visto ser um composto seguro evita a contaminação do solo assim como outros impactos ambientais (Eslami-Nejad et al., 2015).

### 2.3.2. Bombas de Calor Acopladas ao Solo

As BCAS são um subconjunto das BCG, são também conhecidas como Bombas de Calor Geotérmico de circuito fechado. Estas referem-se a um sistema composto por uma rede de várias Bombas de Calor ligadas a um permutador fechado enterrado no solo. As BCAS podem também ser subdivididas de acordo com tipo de permutador utilizado no projeto.

As BCAS verticais são as mais utilizadas. O permutador geotérmico é normalmente construído com tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) em formato de U na ponta, para haver retorno do fluido, enterrados em furos verticais como demonstrado na Figura 7. A tubagem vertical pode ser pré-fabricada num intervalo de 25 a 40 mm de diâmetro nominal padrão. Normalmente, os furos possuem uma profundidade entre 60 a 90 m, dependendo das condições de perfuração do local em questão. Furos mais profundos não são muito usuais, pois as perdas de carga na tubagem são maiores (Kavanaugh & Rafferty, 2014).

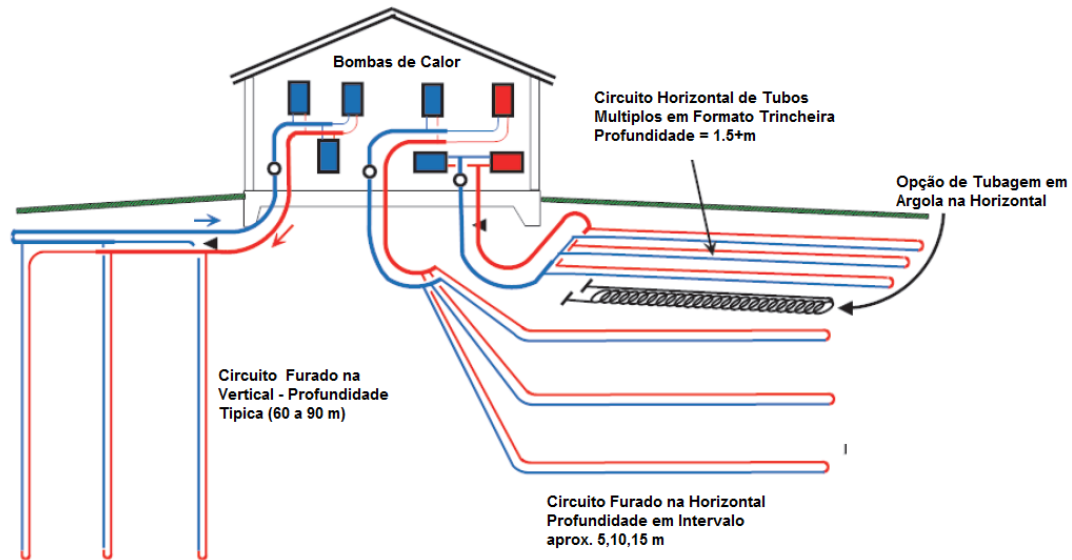


Figura 7 - Bomba de Calor Geotérmico de Circuito fechado com três opções de circuito (Kavanaugh & Rafferty, 2014)

As vantagens das BCAS Verticais são, requerem uma área relativamente pequena de terreno, não necessitam de uma grande quantidade de tubagem e conseqüentemente não é necessário gastar tanta energia com o bombeamento de água, são também as mais eficientes em termos de performance relativamente aos outros sistemas de BCAS (Soni et al., 2015).

A grande desvantagem está associada ao seu custo ser tipicamente elevado devido a dificuldade de instalação do circuito geotérmico, sendo necessário equipamento e pessoal especializado (Kavanaugh & Rafferty, 2014).

As BCAS como demonstrado na Figura 7 podem ser divididas em três grupos sendo estes, circuito geotérmico de tubagem simples, tubagem múltipla e tubagem em forma de argola. O sistema de circuito de tubagem simples é o que requer maior área de terreno, deve ser instalado no mínimo a 1.5 m de profundidade. O sistema de tubagem múltipla deve ser instalado numa trincheira a uma profundidade maior que 1.5 m e com 30 a 60 cm de separação entre tubos, esta instalação reduz a área de terreno necessária, no entanto a quantidade de tubagem necessária é maior de forma a compensar a interferência térmica da tubagem adjacente na mesma trincheira. A instalação com tubagem em formato de argola também reduz a área de terreno necessário, este tipo de circuito pode ser instalado numa trincheira estreita ou deitado no fundo de uma trincheira mais larga (U.S. Department of Energy, 2015).

Existe também um tipo de furação considerada Horizontal, mas que é no fundo uma mistura de circuito horizontal e vertical. Esta instalação também se encontra representada na Figura 7, consiste em tubagens em forma de U instaladas a uma maior profundidade e colocadas em várias camadas

distanciadas pelo menos uns 5 m uma das outras. Este tipo de instalação reduz substancialmente a área de terreno necessário comparado com a instalação horizontal feita mais próxima da superfície (Kavanaugh & Rafferty, 2014).

As vantagens das BCAS são mais baratas do que as BCAS Verticais em pequenas residências (<70kW) pois são mais fáceis de instalar e a maioria das residências têm área adequada para a sua instalação. As desvantagens devem-se, às grandes variações na performance relacionadas com a diferença de temperatura horizontal do terreno provocado pelas estações, chuvas, etc. Uma vez que a quantidade de tubagem necessária é maior, relativamente às BCAS Verticais, a quantidade de energia para bombear é maior e sendo assim as eficiências do sistema vão ser mais baixas (Kavanaugh & Rafferty, 2014).

### **2.3.3. Bombas de Calor de Água Subterrânea**

Como referido anteriormente outro tipo de BCG, são as BCASub ou de circuito aberto, representada esquematicamente na Figura 8. Normalmente, segundo Kavanaugh & Rafferty um único poço de grande volume é suficiente para servir um edifício. Os sistemas de BCASub corretamente dimensionados requerem maior manutenção do que as BCAS ou as BCASup de ciclo fechado injeção (U.S. Department of Energy, 2015).

Existem vários sistemas de BCASub, o mais comum utiliza um permutador central de forma a transferir calor do circuito de água subterrâneo, para o circuito de água fechado que se encontra conectado com a unidade de Bomba de Calor como demonstrado na Figura 8. Outro sistema consiste em fazer circular a água do poço não tratada, diretamente em cada unidade de Bomba de Calor, correndo neste caso o risco de corrosão do permutador e válvulas de controlo (Kavanaugh & Rafferty, 2014).

As vantagens das BCASub são têm um custo de investimento inferior aos sistemas de BCAS, a dimensão do sistema é bastante flexível, a tecnologia é utilizada há décadas pois até ao recente desenvolvimento das BCAS as BCASub eram as mais comuns (Park et al., 2015).

As Desvantagens devem-se ao facto de este sistema só pode ser utilizado, se as águas subterrâneas forem relativamente adequadas em termos de qualidade e as regulamentações ambientais locais permitam a sua utilização. Existem vários estudos focados em alterações ambientais chave, provocadas pelos sistemas geotérmicos superficiais, em especial caso nas BCASub foram descritas algumas reações químicas heterogéneas como o principal fator para potenciais problemas ambientais. Estas incluem o entupimento, corrosão, abrasão, química e biológica da bomba hidráulica submersa, assim como nos permutadores de calor. A alteração da qualidade de água, devido ao armazenamento térmico desta no aquífero foi estudada em laboratório e em campo, demonstrando também alguns problemas ambientais como a erosão do subsolo e estruturas, assim como impactos térmicos neste (Garrido Schneider et al., 2016).

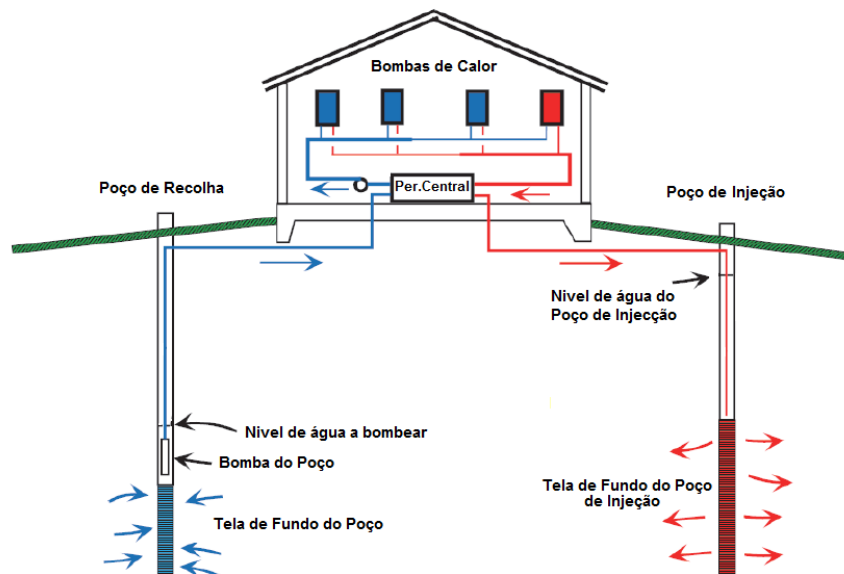


Figura 8 - Bomba de calor de água subterrânea, ou de circuito aberto (Kavanaugh & Rafferty, 2014)

### 2.3.4. Bombas de Calor de Água Superficial

A água subterrânea proveniente de poços normalmente proporciona excelentes coeficientes de performance (Zhu et al., 2015), mas como referido anteriormente vários fatores como a disponibilidade de água e outros problemas associados à qualidade da mesma restringem a sua vasta aplicação. Nesse caso uma BCASup pode bem ser uma alternativa válida para um edifício localizado próximo de um lago, rio ou mar (Schibuola & Scarpa, 2016b).

As BCASup são semelhantes, em aplicação e instalação, às BCAS se tiverem o circuito geotérmico fechado ou semelhantes as BCASub se o circuito for aberto. Apesar da semelhança, as características térmicas da água superficial são bem diferentes das do solo onde a variação térmica é baixa.

Dando especial atenção às BCASup de circuito fechado (Figura 9), estas consistem em unidades de Bombas de Calor água-ar ou água-água localizadas num edifício, ligadas a um circuito externo de tubagem posicionado num lago, rio ou outro tipo de reservatório de água a céu aberto. Observando o esquema da Figura 9 o circuito externo da BCASup submerso no lago funciona de forma análoga ao permutador de calor geotérmico enterrado no solo das BCAS. O tipo de material recomendado para a tubagem é o PEAD com uma proteção ultravioleta (Kavanaugh & Rafferty, 2014).

As vantagens dos BCASup de circuito fechado são relativamente mais baratas que as BCAS, gastam menos energia nas bombas hidráulicas do circuito, requerem pouca manutenção e têm baixos custos operacionais. Por outro lado, as desvantagens estão relacionadas com a localização do permutador externo, visto que este por se encontrar numa zona pública está sujeito a sofrer danos assim como uma amplitude térmica, dependendo da profundidade e tamanho do lago (Kavanaugh & Rafferty, 2014).



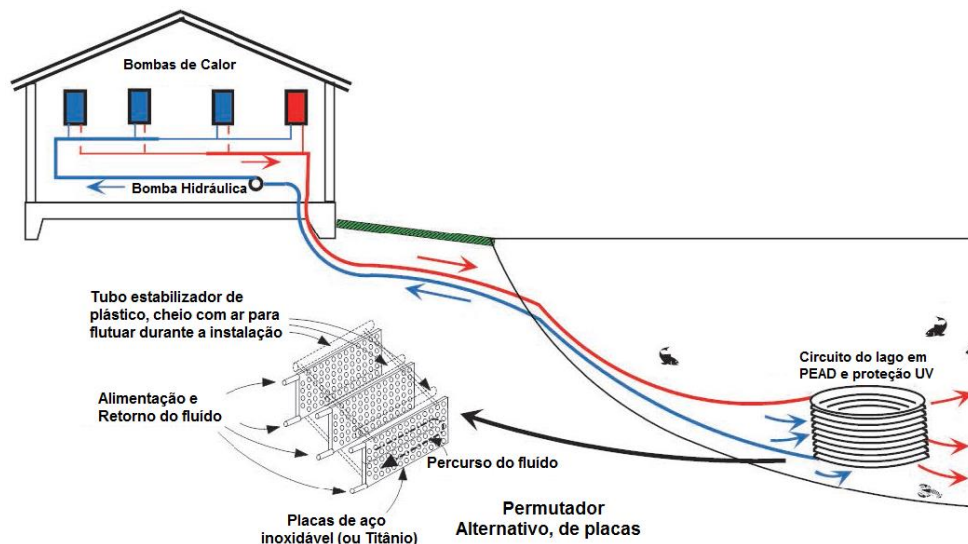


Figura 9 – Bomba de calor superficial de circuito fechado, com duas opções permutador (Kavanaugh & Rafferty, 2014)

### 2.3.5. Fatores que influenciam a escolha do sistema de BCG

Durante a fase preliminar de qualquer projeto de BCG, existem algumas considerações a serem feitas para determinar que tipo de sistema é ideal para o local. A performance de uma Bomba de Calor normal varia dependendo do clima local e as necessidades térmicas do edifício. No caso dos sistemas de BCG outros parâmetros associados aos furos do terreno influenciam a sua performance sendo estes: o tipo de solo, a profundidade do furo, a velocidade do fluido nas tubagens, condutividade térmica do solo, a resistência térmica, taxa de transferência de calor, etc. (Carvalho et al., 2015).

Os parâmetros referidos no parágrafo anterior podem ser organizados em três pontos:

- Parâmetros geotécnicos,
- Propriedades térmicas do solo

#### Parâmetros geotécnicos

Os fatores envolvidos nos parâmetros geotécnicos estão relacionados a espessura e natureza do material que compõe o solo, as diferentes formações de rochas envolvidas assim como as suas propriedades. Isso influencia a condutividade térmica, e questões hidrológicas como a profundidade da água subterrânea assim como a sua variação de direção e quantidade de caudal ao longo das estações do ano.

- **Tipo de material do solo**

Na constituição dos solos existem espaços entre as partículas, poros, que podem ser preenchidos por água e/ou ar. Assim sendo, o solo é um sistema de três fases (sólida, líquida e gasosa) (Fernandes,

2006). Num sistema de energia geotérmica de muito baixa entalpia, o tipo de solo revela ser um parâmetro importante, no seu desempenho e eficiência. Em geral, solos com elevado teor de água conduzem melhor o calor. Solos constituídos por argilas, matéria orgânica ou xisto têm uma condutividade térmica fraca relativamente aos constituídos por quartzo, afetando assim o fluxo de transferência de calor. No entanto alto teor de quartzo e sal, no solo, pode interferir na condutividade térmica (Esen & Inalli, 2009). Solos compostos por camadas de arenito, apesar de terem uma elevada condutividade térmica, têm menores gradientes geotérmicos do que solos compostos por camadas de xisto ou carvão, que por sua vez possuem uma condutividade térmica muito baixa. Isto demonstra a dificuldade em apurar qual o solo mais indicado para a aplicação da BCG (Florides & Kalogirou, 2007).

- **Condições da água subterrânea**

A presença de água no solo tem um efeito significativo no funcionamento dos sistemas geotérmicos. Os fluxos de água no solo dependem da profundidade do nível freático e do tipo de estratificação do subsolo. Mesmo sabendo que a presença de água aumenta a condutividade térmica, se o fluxo for significativamente elevado, o risco de a energia térmica se afastar da zona onde se encontra a furação é maior, reduzindo assim a eficiência do sistema instalado (Diao et al., 2007). Nos solos pouco permeáveis os fluxos de água são baixos, diminuindo assim a quantidade de calor transferido por convecção.

### **Principais propriedades térmicas do solo**

As características das principais propriedades térmicas do solo permitem estudar e modelar o comportamento térmico do solo. Existem três propriedades importantes que afetam o sistema como a condutibilidade térmica, o calor específico/capacidade calorífica e a difusividade térmica. Existe uma outra propriedade, a densidade da rocha que apesar de não ser uma característica térmica, influencia o comportamento térmico dos solos (Brandl, 2006).

- **Condutividade térmica**

A condutividade térmica ( $k$ ) expressa em  $W/m.K$  define a quantidade de taxa de calor que atravessa uma determinada área, por unidade de gradiente de temperatura, de um dado material em estado estacionário. No fundo, avalia a capacidade de um material em conduzir calor.

Características como a densidade de rocha, o teor em água e a composição mineralógica interferem na condutividade térmica. Existem várias tabelas com valores de  $k$  típicos, para diferentes tipos de rocha, no entanto Pode ser determinada com algum rigor, recorrendo a modelos teóricos. Dependendo da precisão que se quer, deverão ser feitos ensaios de laboratório e/ou testes de campo (Brandl, 2006; Moel, 2010).

- **Difusividade térmica**

A difusividade térmica ( $\alpha$ ) é a relação entre a condutividade térmica e a capacidade térmica. Demonstrada na seguinte fórmula (Serway & Jewett, 2014):

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} [m^2 s^{-1}] \quad (2-2)$$

Onde (k) representa a condutividade térmica, ( $C_p$ ) o calor específico, e ( $\rho$ ) a massa volúmica. Um material com uma boa difusividade permite uma rápida diferença de temperatura, ou seja, este ajusta-se rapidamente á temperatura da sua fronteira. A difusividade tende a aumentar na presença de água (Serway & Jewett, 2014).

- **Calor específico**

O calor específico ( $C_p$ ), é a quantidade de calor necessário fornecer à unidade de massa de um material para elevar a sua temperatura uma unidade, expressa-se em J/kg.K, por exemplo quanta energia pode ser absorvida ou dissipada antes de alterar a sua temperatura. No solo, características como a textura, estrutura e humidade afetam o calor específico.

### **2.3.6. Tamanho ótimo do sistema de BCG a aplicar**

Existem vários estudos sobre a integração de sistema de energias renováveis para aplicação em edifícios (Fabrizio et al., 2010; Petersen & Svendsen, 2012; Privitera et al., 2011). O processo de dimensionamento, ou projeto, pode ser dividido em duas partes: projeto conceptual e o projeto detalhado. Os resultados do projeto conceptual podem ser utilizados no projeto detalhado.

Vários estudos propõem métodos para determinar o tamanho ótimo de sistemas de energia renovável que podem ser aplicados numa fase de projeto conceptual (Fabrizio et al., 2010; Privitera et al., 2011). Um método desenvolvido e aplicado num caso de estudo realizado por Fabrizio et al. (2010) tem como objetivo a otimização do projeto de sistemas de energia na fase de conceção, em edifícios. Este utiliza no seu estudo três funções objetivo diferentes: uma função económica, função energética e uma função ambiental. A performance do método é verificada ao comparar cada valor da função objetivo para cada otimização com diferentes funções objetivo.

A utilização de energia renovável geotérmica, para além de outras, foi estudada por Koroneos et al. (2010) para utilização num novo aeroporto. O método utilizado por este consiste em maximizar a função objetivo constituída por a razão entre a eficiência energética e o custo de investimento inicial multiplicado pelo tempo em anos. Para encontrar uma solução ótima Koroneos et al. (2010) utilizam um *software* comercial. Para validar o método este compara os valores da função objetivo com os vários cenários de energia renovável utilizada.

O dimensionamento de forma a minimizar os custos de instalação de tecnologias renováveis em edifícios, é possível utilizando o método de programação linear (Privitera et al, 2011). utiliza este método para comparar a utilização de várias energias renováveis, avaliando o melhor e pior resultado.

As diferentes abordagens descritas anteriormente podem ser utilizadas para uma otimização simples do projeto conceptual de uma BCG, a utilizar em edifícios. No entanto existem várias ferramentas e métodos que utilizam *software* de computador por forma a facilitar o dimensionamento do sistema de energia a utilizar numa fase de projeto conceptual. O *software RETScreen* é válido e amplamente utilizado, desenvolvido com a contribuição do governo Canadiano, indústria e universidades de forma a avaliar a viabilidade dos vários tipos de sistemas de tecnologia limpa, e respetivas eficiências energéticas a implementar em fases iniciais do projeto (RETScreen, 2015). Este *software* é bastante utilizado pois é possível escolher o sistema de energia térmica de uma forma muito direta, sendo um dos poucos programas em que possibilita a escolha da tecnologia da bomba de calor geotérmico. No entanto este ainda não consegue otimizar os componentes do sistema (Connolly et al., 2010).

### **2.3.7. Visão geral da plataforma de software RETScreen**

O *software RETScreen* é um programa de computador utilizado para facilitar a análise na avaliação de projetos, de energias renováveis, como projetos de tecnologias de eficiência energética, estando incluídas as BCG entre outras tecnologias. O *software* foi desenvolvido para ser utilizado no programa *Microsoft® Excel*. O utilizador seleciona a tecnologia de acordo com o projeto a analisar e tem de efetuar a análise em cinco passos: análise de custos, análise aos gases de efeito de estufa, resumo financeiro, e uma análise de sensibilidade e riscos. O *software* necessita que sejam introduzidos dados importantes para efetuar o balanço de energia, como a carga térmica do edifício a instalar a BCG, assim como o recurso energético a utilizar neste caso geotérmico. Com os dados introduzidos é possível obter a poupança de energia anual. O *software* também possibilita uma análise de custos de investimento assim como custo de manutenção anuais ou periódicos. O *RETScreen* permite analisar a redução dos gases com efeito de estufa, ao utilizar uma solução alternativa. Na análise financeira o utilizador especifica os parâmetros necessários, como as taxas de juro, incentivos, de forma a calcular o valor anual líquido (VAL), etc. Finalmente a análise de risco e sensibilidade ajuda o utilizador a determinar a incerteza dos parâmetros chave utilizados no projeto (Lee et al., 2012).

A performance do *software RETScreen* foi e pode ser validada fazendo a comparação nos cálculos obtidos com medições efetuada ou simulação detalhada, do projeto em estudo (Lee et al., 2012).

### 3. Enquadramento do Caso de Estudo

#### 3.1. Sistemas de BCG em Portugal

A utilização de sistemas geotérmicos no aquecimento e arrefecimento de espaços, em Portugal, não é tão pronunciada comparativamente com outros países europeus (Carvalho et al., 2005; Cabeças et al., 2010). A energia maioritariamente utilizada para esse propósito provem da energia primária: gás natural, carvão, solar, eólica e biomassa (Costa & Amaral, 2011).

Segundo (Costa & Amaral, 2011) as BCG utilizadas em Portugal de circuito aberto foram inicialmente utilizadas em instalações residenciais. No entanto, a falta de informação sobre os impactos ambientais do circuito aberto foi a razão da substituição desta tecnologia por circuito fechado, como as BCAS.

Foi efetuado um estudo por (Carvalho, 2003), que investigou o potencial da aplicação de sondas geotérmicas, ou furos, em Portugal em diferentes zonas climáticas. Nesse estudo foi avaliado as aplicações geotérmicas existentes, a situação energética do País nomeadamente a sua produção e consumo. O estudo revelou que as principais razões para justificar o porquê da utilização de sistemas de aquecimento e arrefecimento não serem tão comuns, apesar de se constatar para a altura um crescimento na procura desses sistemas, deve-se ao clima ameno do País, restrições económicas e o hábito na utilização de biomassa ou aquecedor elétrico para o aquecimento de espaços.

Em 2010, a Escola Superior de Tecnologia do Politécnico de Setúbal contribuiu com um teste em condições reais na aplicação de dois tipos de sonda geotérmica vertical, tubagem vertical em “U” e tubagem coaxial, no clima Português. O objetivo do estudo prendeu-se na melhoria da relação custo e eficácia do sistema geotérmico, demonstrar a penetração das BCAS no mercado e a performance do sistema em condições reais. A cidade de Setúbal foi uma das cidades selecionadas para a demonstração da performance do sistema em condições reais, localizada perto de Lisboa. O dimensionamento do sistema geotérmico foi efetuado considerando as características geológicas e climatéricas do local e a necessidade de energia térmica do edifício em estudo. O resultado do estudo demonstrou que a condutividade térmica é maior para o sistema de tubagem em “U” comparativamente com a coaxial, demonstrou melhores resultados com maiores variações de temperatura e maior dissipação de calor (Coelho et al., 2010).

Posteriormente em 2011 Coelho et al. (2011) efetuaram um estudo, no âmbito do projeto GROUND-MED, na cidade de Coimbra, onde foi avaliado o sistema de BCAS no aquecimento e arrefecimento no clima Mediterrâneo. O edifício em estudo situava-se perto da margem do rio Mondego, foi utilizado o *software EnergyPlus* para efetuar a simulação da carga térmica do edifício e a seleção da sonda geotérmica foi efetuada de acordo com as características do solo da região obtidas através do *software Earth Energy Designer*. Os resultados obtidos para a carga térmica anual foram de 26 MWh no modo de arrefecimento e 4,5 MWh no modo de aquecimento, para o tamanho do sistema geotérmico foi obtido o comprimento total de 611 m, o qual foi distribuído em 4 sondas verticais, para um COP de 5. De notar que o fluido de trabalho do sistema geotérmico foi o monoetilenoglicol 25%, não foi considerado o consumo de água quente no edifício, e a simulação foi efetuada para um período de 10 anos (Coelho et.al, 2011)

Colaço (2015) elaborou um caso de estudo, onde foram avaliados os parâmetros climatéricos e geológicos de 12 cidades Portuguesas, por forma, a compreender as condições adequadas na instalação de BCAS. Foi obtido uma correlação entre a eficiência dos sistemas e a dimensão do sistema geotérmico. No geral os cálculos da eficiência das sondas geotérmicas demonstram que o território Português tem um enorme potencial para a utilização deste tipo de sistemas.

### 3.2. Enquadramento Climático Regional

Segundo a classificação climática de Köppen (Peel et al., 2007) o Município da Amadora enquadra-se no clima temperado mediterrâneo, o mesmo característico da maior parte da Península Ibérica. Mais especificamente, encontra-se localizado numa área de transição de dois subtipos climáticos mediterrâneos representados na Figura 10, Csa e Csb. De acordo com a classificação de Köppen a letra “C” indica que o clima é temperado, a letra “s” indica que o clima apresenta um período seco no Verão, a letra “a” indica que a temperatura média mensal do mês mais quente é superior a 22 °C e a letra “b” indica que a temperatura média mensal do mês mais quente é inferior ou igual a 22 °C para além de 4 ou mais meses possuírem obrigatoriamente uma temperatura média superior a 10 °C (Instituto de Meteorologia e Agência Estatal de Meteorologia, 2011)

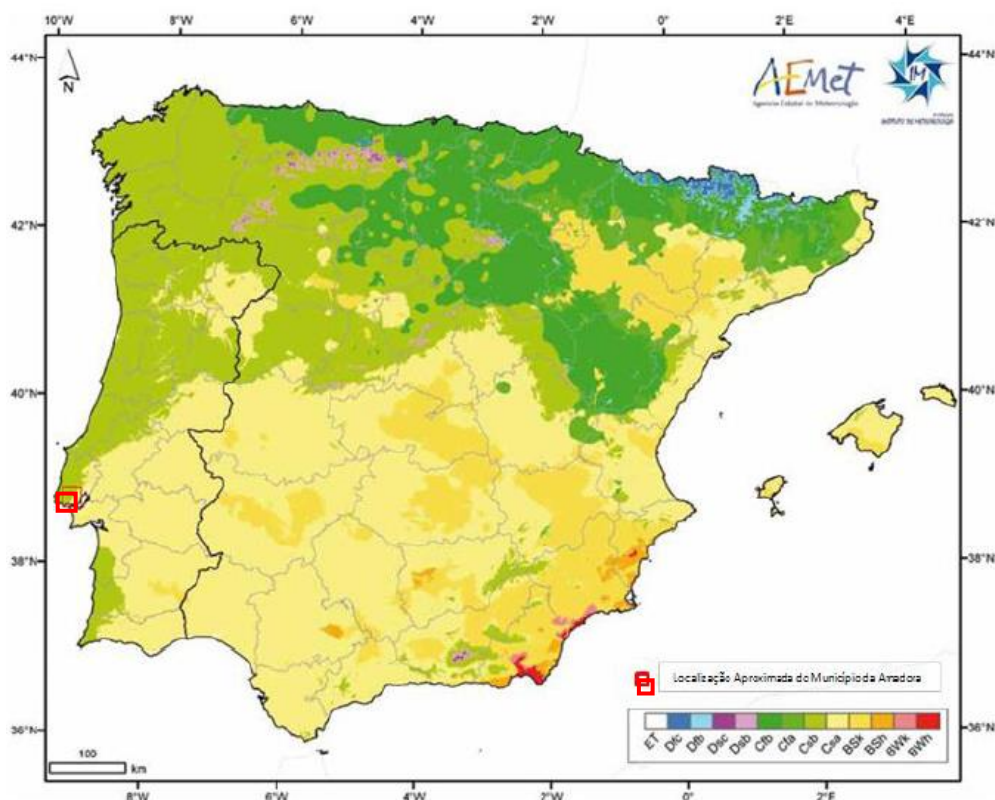


Figura 10 - Classificação climática de Köppen aplicada à Península Ibérica, adaptado do Atlas Climático Ibérico de 2011 produzido pela Agência Estatal de Meteorologia em cooperação com o Instituto de Meteorologia.

Os dados climáticos para a região da Amadora são fornecidos através do *software RETScreen*, que recolhe e examina os dados das estações meteorológicas em terra próximas do local, assim como,

dados de satélites tratados pela NASA, nos últimos anos. Os dados obtidos para a região encontram-se representados nas tabelas que se seguem (RETscreen2015).

O número de graus-dia de cada mês representados Tabela 2, são obtidos através do cálculo da área entre a curva de temperatura real e a linha do valor limite de temperatura, do período em questão. Os graus-dia expressam a gravidade e duração do tempo frio ou quente. O *software RETScreen* considera a linha do valor limite de temperatura (temperatura interior pretendida) para graus-dia de aquecimento e arrefecimento. Exemplificando de uma forma simples, se a temperatura média do ar num determinado mês da estação de inverno for de 7 °C, a temperatura interior pretendida for de 18 °C, isso equivale a 341 graus-dia de aquecimento, tendo em conta que o mês tem 31 dias.

$$GD = 31 \times (\text{Temperatura interior pretendida} - \text{Temperatura média exterior mensal}) \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3-1)$$

Quanto menor o valor de graus-dia, menor é a quantidade de energia para climatizar o espaço em questão (Banks, 2009).

Tabela 1 - Localização dos dados climáticos (RETscreen, 2015).

<b>Amadora</b>	<b>Unidades</b>	<b>Localização dos dados climáticos</b>
Latitude	°N	38,8
Longitude	°E	-9,1
Elevação	m	114,0
Temperatura de dimensionamento de aquecimento	°C	5,8
Temperatura de dimensionamento de arrefecimento	°C	32,1
Temperatura do solo	°C	18,5
Amplitude da temperatura do solo	°C	10,0

“Nota”: A temperatura de dimensionamento representa a temperatura mínima ou máxima (aquecimento ou arrefecimento) que foi medida na região com uma frequência de pelo menos 1% ao longo do ano. Por exemplo para a região da Amadora temperaturas inferiores a 3,4°C e superiores 32,1°C não são considerados para o dimensionamento do sistema geotérmico uma vez que a sua frequência é inferior a 1% (RETScreen, 2015).

Como é possível observar na Tabela 2, destaca-se um período quente, outro de temperaturas mais amenas ou de transição e um período mais frio. O período quente tem uma duração aproximada de 4 meses, de Junho a Setembro, caracterizando-se por temperaturas médias mensais na ordem dos 20 °C a 22 °C. Em contraste com a situação anterior surge um período de Novembro a Março, no qual se registam os períodos com médias mensais abaixo de 15 °C, sendo o mês de Janeiro o mês mais frio do ano. Entre os dois períodos anteriores surgem os meses de transição, nos quais se registam as temperaturas amenas.

Tabela 2 - Temperaturas obtidas para o ar ambiente, graus dia de aquecimento e arrefecimento para os diferentes meses do ano na Amadora (RETscreen, 2015).

Mês	Temperatura do ar [°C]	Graus-dia aquecimento [°C-d]	Graus-dia arrefecimento [°C-d]	Radiação solar média horizontal [kWh/m <sup>2</sup> /dia]
Janeiro	10,9	220	28	2,40
Fevereiro	11,8	174	50	3,31
Março	14,0	124	124	4,72
Abril	15,0	90	150	6,00
Maio	17,3	22	226	6,82
Junho	20,6	0	318	7,26
Julho	22,5	0	388	7,25
Agosto	22,9	0	400	6,71
Setembro	21,5	0	345	5,39
Outubro	18,1	0	251	3,81
Novembro	14,4	108	132	2,59
Dezembro	12,0	186	62	2,01
<b>Anual</b>	<b>16,8</b>	<b>923</b>	<b>2474</b>	<b>4,86</b>

Como referido anteriormente, o Município da Amadora encontra-se próximo da transição entre duas regiões climáticas distintas. Esta transição é definida pela faixa montanhosa descontínua constituída pelas Serras de Sintra, Montejunto, Candeeiros e Estrela, possui uma temperatura média anual de 16,8 °C, que representa um valor típico da região Centro-Sul do País. Deste modo, o Município apresenta uma maior aproximação ao clima “Csa” segundo a classificação climática de Köppen.

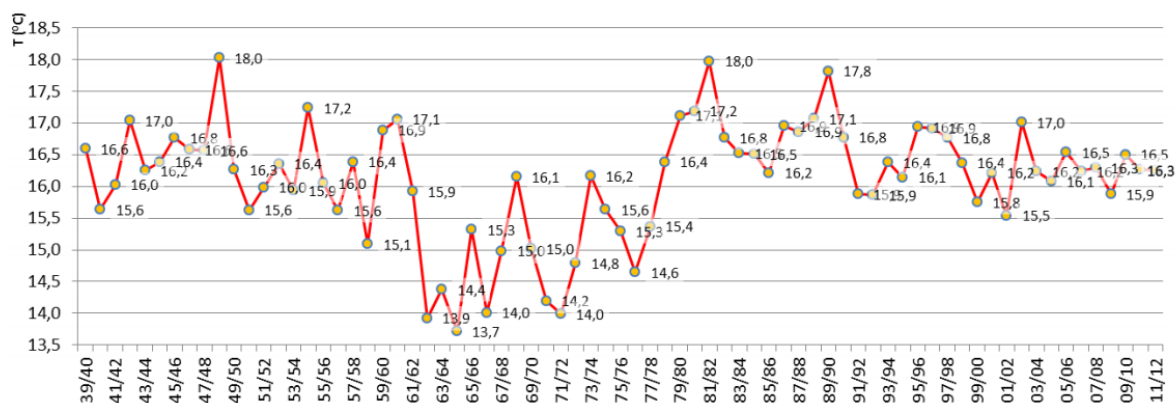


Figura 11 - Evolução da temperatura média anual no Município da Amadora entre 1915 e 2012 (Fonte: Câmara Municipal da Amadora, Serviço Municipal de Proteção Civil, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, TERCUD - Centro de Estudos do Território, Cultura e Desenvolvimento, 2013)

Considerando os valores médios anuais dos vários anos da série, verificam-se algumas flutuações e desvios, como por exemplo nos anos hidrológicos de 48/49 e 80/81, os quais foram os mais quentes de sempre, com uma temperatura média anual de 18,0 °C. Já o ano de 64/65 foi o mais frio, com uma média anual de apenas 13,7 °C, como comprovam, igualmente, algumas notícias da época. Ao longo



de toda a série, evidenciam-se dois períodos de temperaturas mais elevadas apenas interrompidos por um período de arrefecimento durante a década de 1960 (Miranda et al., 2006).

### **3.3. Caracterização geológica do Município da Amadora**

O local de estudo, onde se insere a Academia Militar – Aquartelamento da Amadora, fica localizado nas folhas 430 e 431, cartografia militar de Portugal, à escala 1/25000, dos Serviços Cartográficos do Exército, na Freguesia da Venteira e Concelho da Amadora. Do ponto de vista morfológico trata-se de uma zona aplanada, definida por uma plataforma com declives suaves, com cotas de terreno natural que variam entre 121 m a 128 m, no limite Oeste da Academia Militar - Aquartelamento da Amadora, junto da Avenida do Regimento de Comandos, e 136 m na zona Este, próximo da Av. Conde Castro Guimarães. Do ponto de vista geológico a área em estudo está contida nas folhas nº 34-C (Cascais) e 34-D (Lisboa) da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000 (Pais et al., 2006; Ramalho et al., 2001).

A Figura 12 representa a Carta Geológica do Município da Amadora, assim como a região onde se insere a Academia Militar delimitada a amarelo. É possível verificar, através da Figura 12, que a região delimitada a amarelo fica localizada numa zona onde afloram materiais vulcânicos designados na literatura da especialidade por Complexo Vulcânico de Lisboa (CVL), instalado entre o Cretácico superior e o Holocénico (Ramalho et al., 1993, 2001; Zbyszewski, 1963,1964).

Sendo assim, em termos de geologia regional e local é de referir o seguinte:

a) O CVL que ocupa uma extensão de cerca de 200 km<sup>2</sup> entre Lisboa, Sintra, Mafra e Runa, é constituído por uma sucessão de derrames lávicos, representado sobretudo por basaltos, separados por níveis de materiais piroclásticos (brechas, aglomerados, tufos, cineritos, cinzas, etc.) e algumas camadas sedimentares (conglomerados, argilas, etc).

b) O CVL assenta quer sobre os calcários margosos do Holocénico, quer sobre os calcários recifais do Cretácico superior, sendo coberto pontualmente pelas camadas conglomeráticas paleogénicas do Complexo de Benfica (Ramalho et al., 1993, 2001; Zbyszewski, 1963,1964).

c) O empilhamento de materiais vulcânicos (lavas e piroclastos) pode apresentar espessuras variáveis de um local para outro, entre escassos metros (10 m) e centenas de metros, como é exemplo a área situada entre Caneças e Odivelas e em Carnaxide, onde foram identificadas espessuras de mais de 400 m. Resultante da atividade que determinou a instalação do CVL resultou fracturação de expressão regional, desenvolvendo-se sistemas de falhas de orientação NNE-SSW e NNW-SSE.

Resumindo, as formações geológicas do local onde se insere a Academia Militar – Aquartelamento da Amadora, são essencialmente compostas por basaltos e traquibasaltos, maioritariamente pertencentes ao CVL. Em relação às formações sedimentares destacam-se claramente as rochas calcárias, seguidas de arenitos (Crucho & Costa, 2013). A Tabela 3 apresenta as características das principais propriedades térmicas dos vários tipos de rocha presentes na região.

Tabela 3 – Tabela de propriedades térmicas das rochas características da região da Amadora a 25 °C (Colaço, 2015).

Tipo de rocha	Condutividade térmica (k) [W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]			Calor específico (Cp) [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Densidade da rocha (ρ) [kg.m <sup>-3</sup> ]	Difusividade térmica (α) [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	
	Minima	Média	Máxima			Minima	Máxima
<b>Basalto</b>	2,0	2,2	2,4	712 – 879	2880	0,97x10 <sup>-6</sup>	1,17x10 <sup>-6</sup>
<b>Calcário</b>	1,4	2,4	3,4	920	2400	0,64x10 <sup>-6</sup>	1,54x10 <sup>-6</sup>
<b>Grés</b>	2,0	2,5	3,0	1005	2560	0,77x10 <sup>-6</sup>	1,17x10 <sup>-6</sup>

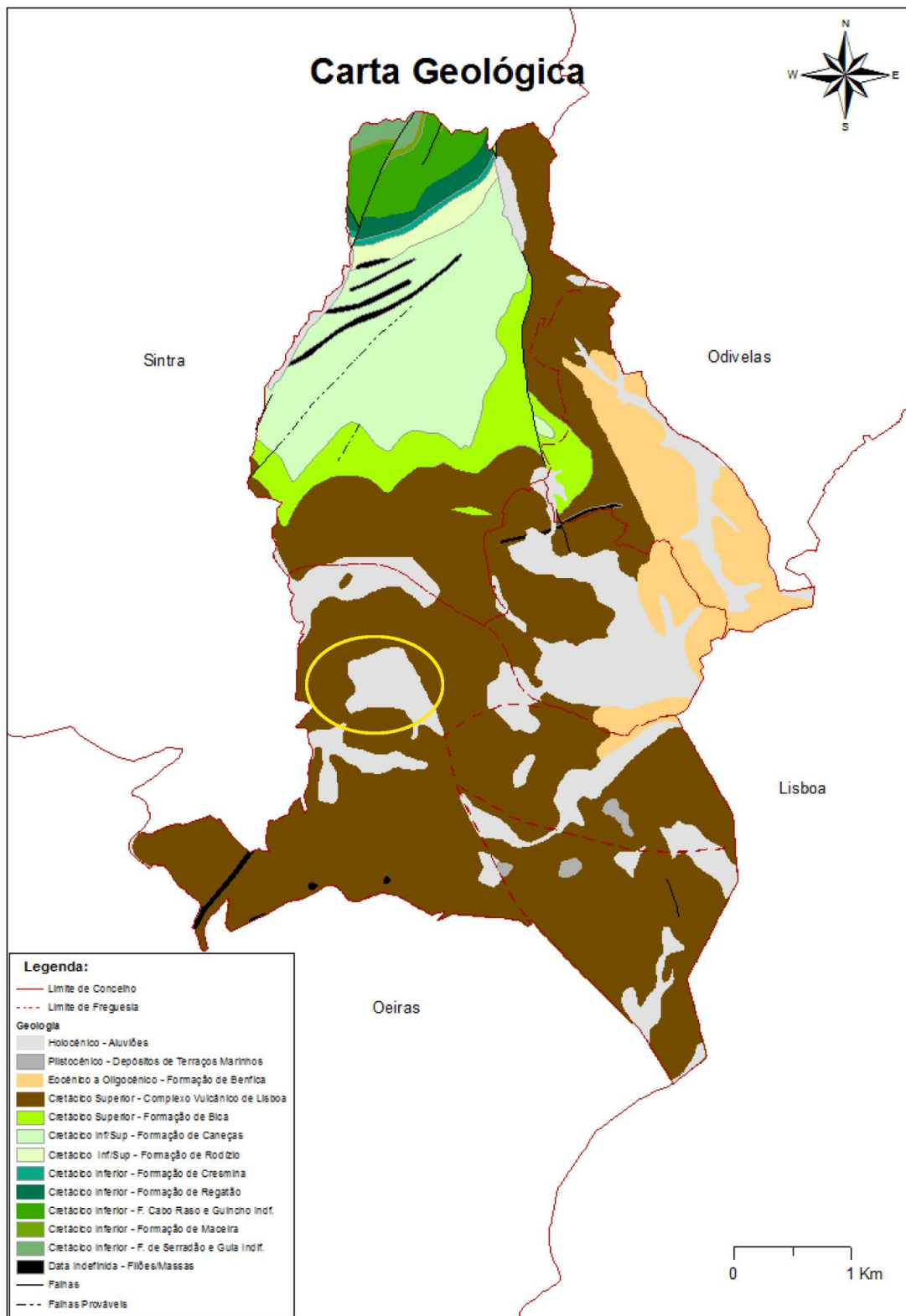


Figura 12 - Carta Geológica do Município da Amadora (Crucho & Costa, 2013)

### 3.3.1. Componente hidrogeológica do Município da Amadora

Do ponto de vista de drenagem superficial a área da Academia Militar - Aquartelamento da Amadora situa-se na bacia de drenagem do Rio Jamor, numa zona onde a rede hidrográfica ainda existente assume uma direção preferencial de escoamento de Este para Oeste. No entanto, a grande expansão urbana existente na zona, associada à necessidade de regularização dos terrenos através da criação de diversos aterros, levou a que atualmente grande parte da drenagem superficial da área esteja assente na rede pública de saneamento, que através de coletores subterrâneos, conduz as águas pluviais e residuais. No Complexo Vulcânico de Lisboa ocorrem materiais piroclásticos intercalados em derrames basálticos que podem ocasionar o aparecimento de algumas nascentes e que conduziram à construção de poços, minas, galerias e, mais recentemente de furos verticais. Os caudais disponíveis são geralmente fracos, de 0,5 a 1 L/s. Os recursos hídricos subterrâneos são fracos, não servindo senão para satisfazer a pequena procura local a partir de níveis produtivos limitados, descontínuos e de baixa permeabilidade. Contudo, estas formações são consideradas importantes como áreas de recarga de aquíferos profundos a partir das zonas alteradas e de mais forte diaclasamento. Neste contexto, esta unidade geológica, do ponto de vista hidrogeológico, pode ser entendida como um aquífero.



Figura 13 – Edifício em estudo delimitado a amarelo, localização dos poços de captação existentes na Academia Militar - Aquartelamento da Amadora, representados por (●): locais de amostragem

Os poços de captação (de 1 a 5) da Academia Militar - Aquartelamento da Amadora, representados na Figura 13, foram escavados no Complexo Vulcânico de Lisboa, têm em média 10 metros de profundidade segundo dados recolhidos no local. De acordo com a terminologia do INAG (2000) e, mais recentemente do Plano de Gestão de Região Hidrográfica do Tejo (PGRH-RH5, 2012), esta unidade geológica, ao nível das unidades hidrogeológicas de Portugal, não se encontra classificada como sistema aquífero. Não constitui, também, uma massa de água conforme a terminologia atualmente adotada pela Agência Portuguesa da Água (APA).

### 3.4. Edifício da Academia Militar – Aquartelamento da Amadora

A Academia Militar como estabelecimento de Ensino Público Universitário Militar, inserido no sistema de Ensino Superior Nacional, está separada em dois *campus*. O *campus* da Sede situa-se em Lisboa na Rua Gomes Freire, onde se localizam os Órgãos de Comando, Conselho e Apoio ao Comando, e parte do corpo de alunos, particularmente os alunos externos que frequentam as partes respetivas dos seus cursos no Instituto Superior Técnico, Faculdade de Medicina da Universidade de Lisboa e os alunos dos cursos de pós-graduação. O *campus* que serve de local ao caso de estudo desta Dissertação é o Aquartelamento da Amadora, que está localizado na Avenida Conde Castro Guimarães, onde se situa parte significativa do Corpo de Alunos, nomeadamente os alunos internos, os Serviços Académicos, e parte proporcional dos Serviços de Apoio e Administração (Academia Militar, 2016).

O *campus* do Aquartelamento da Amadora tem uma área aproximada de 85 hectares, e pode ser observado na Figura 14 delimitada a amarelo.



Figura 14 – *Campus* da Academia Militar - Aquartelamento da Amadora, delimitado a amarelo com 85 hectares de área.

Através da observação da Figura 14 é possível verificar que o Aquartelamento da Amadora é composto por vários edifícios. O edifício escolhido para o caso de estudo é um dos edifícios que funciona como dormitório para os alunos internos da Academia Militar. Este edifício foi considerado para efetuar o estudo de viabilidade do caso de estudo pelo facto de estar mais próximo da “Casa da caldeira”, possibilitando aproveitar parte do sistema de distribuição de energia térmica, nomeadamente algumas tubagens e permutadores de calor. O edifício escolhido pode ser observado na Figura 15 e Figura 16.

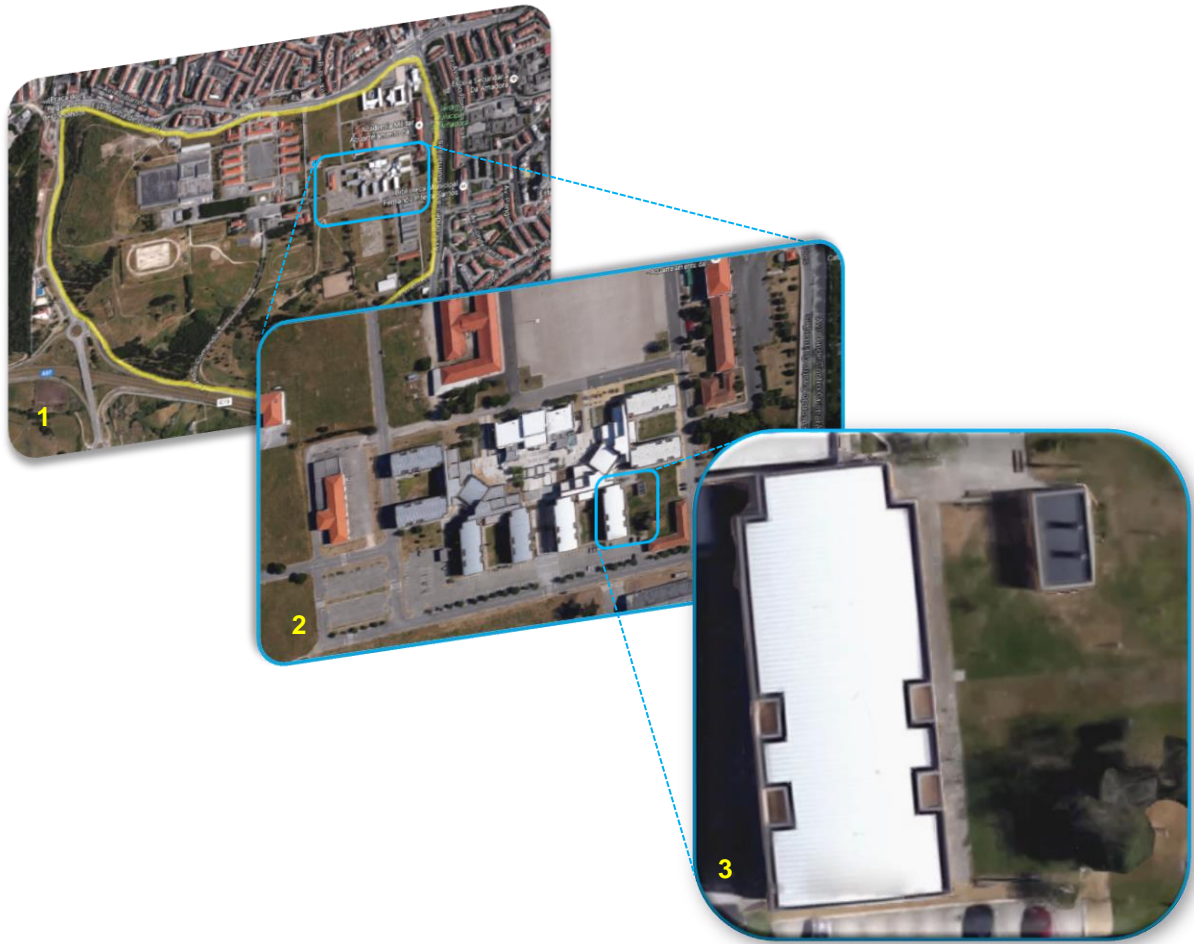


Figura 15 - Edifício escolhido para o caso de estudo, representado na 3ª vinheta da figura.



Figura 16 – Vista tridimensional do edifício a climatizar.

### 3.4.1. Caracterização do edifício

O edifício do caso de estudo é composto por três pisos, rés-do-chão (piso 0), primeiro andar (piso 1) e segundo andar (piso 2), como se pode observar na Figura 16. O edifício possui uma área de implementação de 535 m<sup>2</sup>, e cada piso apresenta um pé direito de 2,70 metros. O edifício em estudo serve de dormitório e tem capacidade máxima para 78 alunos internos do Aquartelamento da Amadora. A estrutura do edifício é de betão armado, constituída por pilares, lajes e vigas. Os três pisos são de igual planta, a qual se encontra representada na Figura 17.

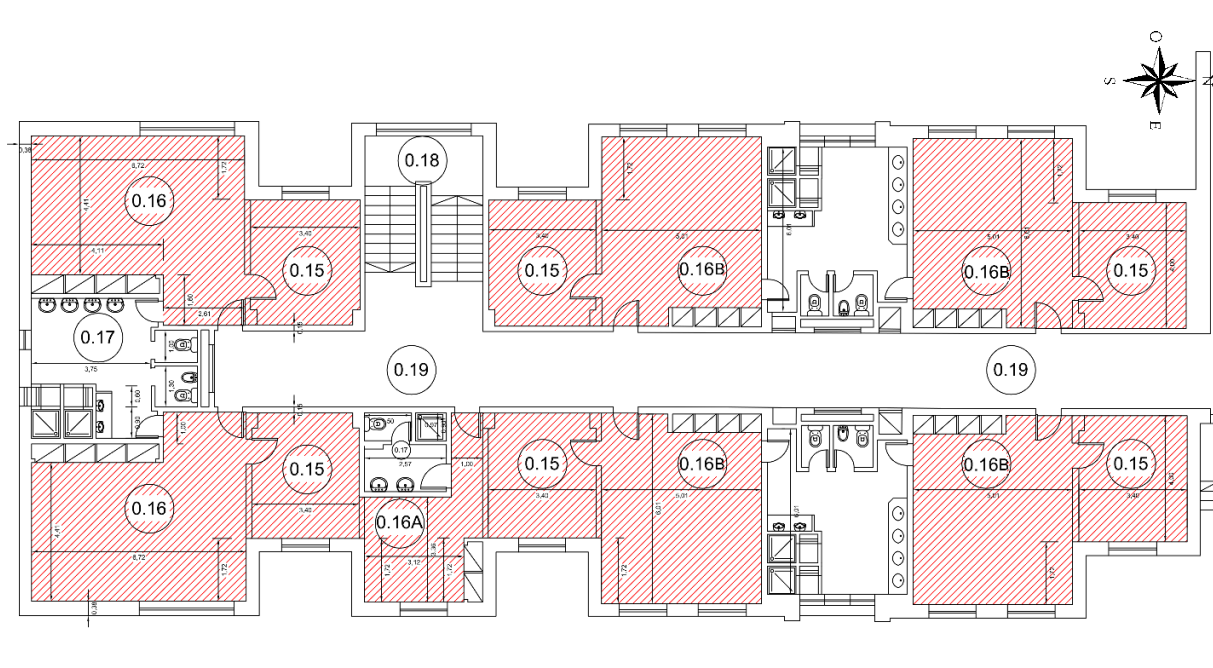


Figura 17 - Planta do Piso 0, equivalente no Piso 1 e 2. Áreas úteis a climatizar a vermelho. Figura adaptada da planta do projeto de execução do edifício do alojamento de alunos da Academia Militar destacamento da Amadora.

É possível observar os diferentes espaços que constituem cada piso, através da legenda da Figura 17, descrita na Tabela 4.

Tabela 4 – Descrição dos espaços da Planta dos Pisos 0,1 e 2 do edifício em estudo.

Espaço	Legenda
<b>0.15</b>	Sala de Estudo do Quarto
<b>0.16</b>	Quarto de Alunos de 4 camas - Grande
<b>0.16B</b>	Quarto de Alunos de 4 camas
<b>0.16A</b>	Quarto de Alunos de 2 Camas
<b>0.17</b>	Instalações Sanitárias de Apoio do Quarto de Alunos
<b>0.18</b>	Sala de Bastidores
<b>0.19</b>	Circulações

Dos espaços descritos na Tabela 4, os Corredores e as Instalações Sanitárias (IS) de Apoio do Quarto de Alunos são considerados espaços não úteis, ou seja, sem necessidade de aquecimento. O levantamento dimensional relativamente às áreas de pavimento a climatizar, representadas a vermelho na Figura 17, são demonstradas na Tabela 5.

Tabela 5 -Áreas dos espaços a climatizar em cada Piso do Edifício.

<b>Espaço a climatizar</b>	<b>Área [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Quantidade por Piso</b>
Sala de Estudo do Quarto	13,6	6
Quarto de Alunos de 4 camas - Grande	33,7	2
Quarto de Alunos de 4 camas	30,1	4
Quarto de Alunos de 2 Camas	10,3	1

A área útil de cada piso do edifício, considerada para a determinação da carga térmica necessária nas diferentes estações do ano, equivale ao somatório dos espaços a climatizar representados na Tabela 5. O somatório dos espaços a climatizar por piso tem o valor de 279,8 m<sup>2</sup>. Sendo o edifício composto por três pisos de igual planta, a área total a climatizar no edifício equivale a 839,0 m<sup>2</sup>.

### 3.4.2. Envolvente exterior

A envolvente exterior refere-se ao conjunto de elementos que separam o espaço interior climatizado e o ambiente exterior do edifício. As paredes exteriores duplas do edifício, a cobertura plana do piso 2 e o pavimento do piso 0, são os elementos considerados como envolvente exterior no caso de estudo.

O levantamento dimensional dos componentes da envolvente exterior segue o Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013 referente ao Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto e é feito recorrendo: i) à planta do edifício Figura 18 para a obtenção da espessura e comprimento do elemento construtivo, ii) à observação das características dos elementos no local, assim como iii) à utilização de publicações de referência do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para a obtenção das soluções mais adequadas dos elementos construtivos.

A área da parede da envolvente exterior em cada piso é efetuada pelo interior do edifício de acordo com o Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013. Tendo em conta o pé direito por piso de 2,7 metros, como referido anteriormente, o valor por piso é de 214,9 m<sup>2</sup>. O valor anterior inclui a área referente aos envidraçados pertencentes à envolvente exterior, representados a azul claro na Figura 18. Sendo assim subtraindo o valor da área total de envidraçados obtém-se o valor da área útil da parede da envolvente exterior por piso, representada a vermelho na Figura 18, que é de 180,7 m<sup>2</sup>. Sabendo que a área total para os três pisos equivale ao triplo do valor anterior, obtém-se assim área útil total de 542,0 m<sup>2</sup>.



Relativamente à cobertura do piso 2 e pavimento do piso 0, a área de cada um destes elementos pertencentes à envolvente exterior equivale à área obtida no subcapítulo anterior de 279,8 m<sup>2</sup> por piso.

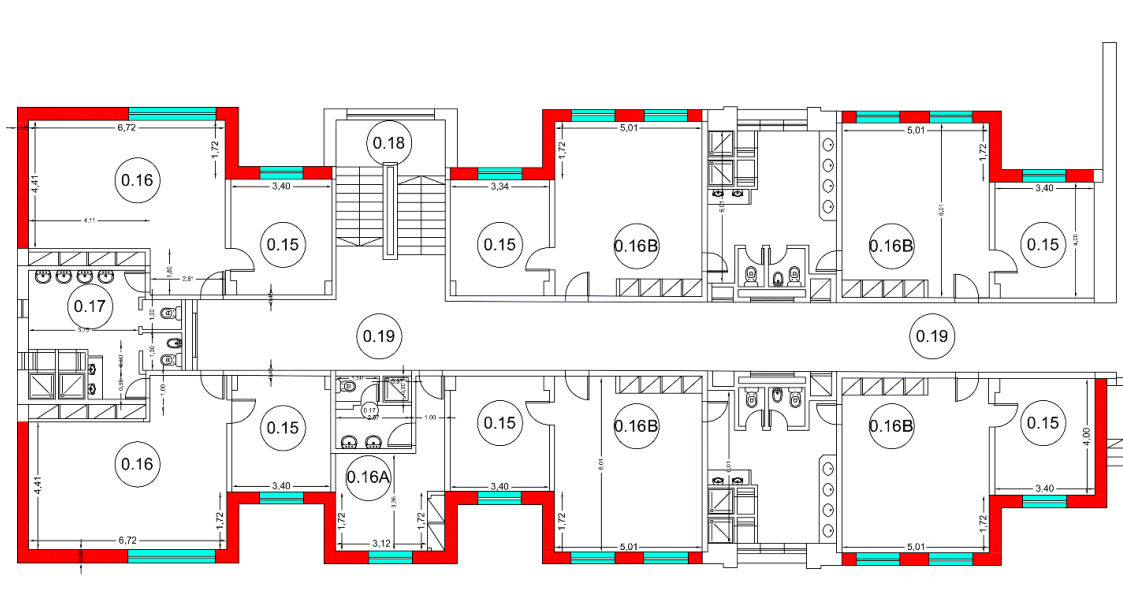


Figura 18 - Planta do Piso 0, equivalente no Piso 1 e 2. Parede pertencente à envolvente exterior do espaço a climatizar (representada a vermelho), e envidraçados (representados a azul claro). Figura adaptada da planta do projeto de execução do edifício do alojamento de alunos da Academia Militar destacamento da Amadora.

As Informações Técnicas do Edifício (ITE) 50 e 54, são os documentos do LNEC utilizados que permitem identificar as soluções e características dos elementos que constituem a envolvente do edifício. As soluções adotadas são sempre coerentes com as características observadas do elemento no local. Em caso de dúvida na solução adequada, a escolha desta é sempre a mais conservadora de entre as soluções apresentadas nos referidos documentos. Sendo assim, é possível observar nas Tabelas seguintes a composição considerada para os elementos que compõem a envolvente exterior. A Tabela 6 representa a composição considerada para a parede dupla pertencente à envolvente exterior do edifício, a Tabela 7 a cobertura do piso 2 e a Tabela 8 o pavimento do piso 0.

Tabela 6 – Composição considerada para a parede dupla pertencente à envolvente exterior (Pina dos Santos & Matias, 2006; Pina dos Santos & Rodrigues, 2009).

Composição	Espessura [m]
Revestimento cerâmico exterior	0,02
Reboco	0,02
Alvenaria de tijolo cerâmico furado	0,15
Caixa-de-ar	0,02
Poliestireno expandido extrudido (XPS)	0,04
Alvenaria de tijolo furado	0,11
Gesso (estruque) tradicional	0,02
$\sum_j$ Espessura	0,38

Tabela 7 - Composição considerada para a cobertura do piso 2, pertencente à envolvente exterior (Pina dos Santos & Matias, 2006; Pina dos Santos & Rodrigues, 2009).

<b>Composição</b>	<b>Espessura [m]</b>
Revestimento exterior	0,020
Betonilha de regularização	0,100
Poliestireno extrudido	0,040
Tela impermeabilizante	0,006
Betonilha de assentamento	0,100
Betão Armado	0,200
Gesso (estruque) tradicional	0,020
$\sum_j Espessura$	0,490

Tabela 8 - Composição considerada para o pavimento do piso 0, pertencente à envolvente exterior (Pina dos Santos & Matias, 2006; Pina dos Santos & Rodrigues, 2009).

<b>Composição</b>	<b>Espessura [m]</b>
Revestimento cerâmico	0,02
Betonilha de assentamento	0,10
Poliestireno expandido extrudido	0,04
Betão Armado	0,24
$\sum_j Espessura$	0,40

### 3.4.3. Envolvente Interior

A envolvente interior refere-se à fronteira que separa a região interior climatizada da região interior não climatizada como por exemplo os corredores, as IS de apoio aos alunos, assim como edifícios adjacentes, de cada piso.

Considera-se como envolvente interior as paredes interiores do edifício, representadas a azul-escuro na Figura 19. O levantamento dimensional assim como a sua composição, é feito pelo mesmo método utilizado na obtenção da área da envolvente exterior. Recorrendo à planta representada na Figura 19 obtém-se a espessura da parede interior, e utilizando o documento ITE 50 do LNEC desenvolvido por Pina dos Santos & Matias (2006) é possível obter a Tabela 9, a qual representa a composição mais conservadora considerada para a envolvente interior.

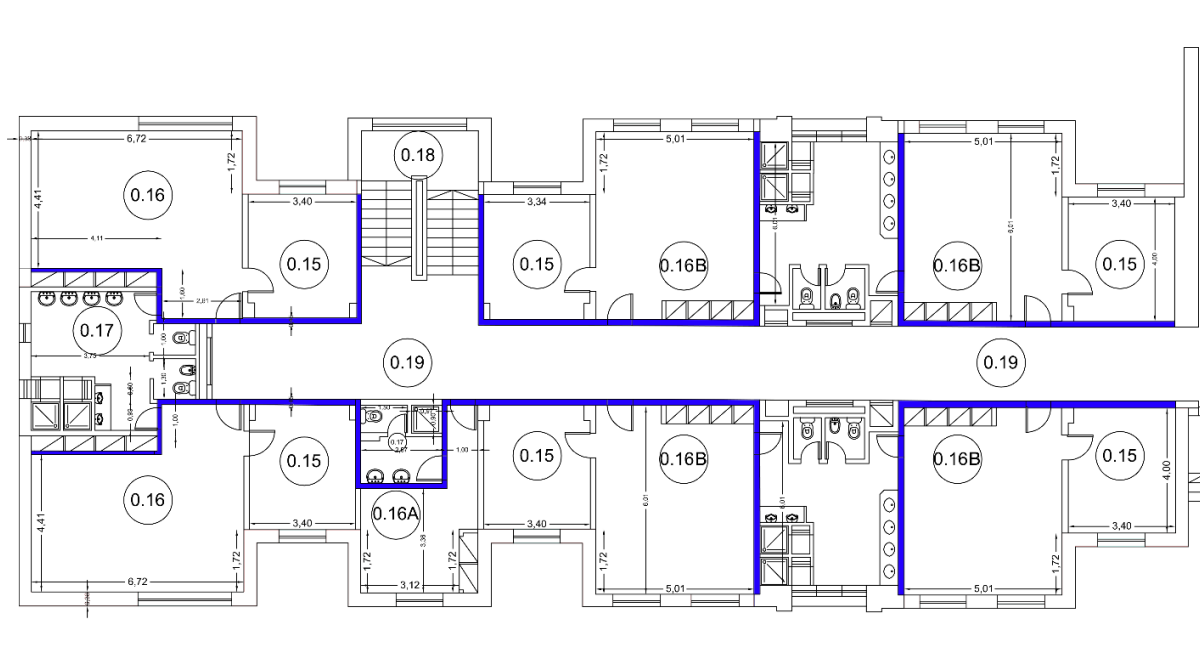


Figura 19 - Planta do Piso 0, equivalente no Piso 1 e 2. Parede pertencente à envolvente interior do espaço a climatizar (representada a azul escuro). Figura adaptada da planta do projeto de execução do edifício do alojamento de alunos da Academia Militar destacamento da Amadora.

A área da parede da envolvente interior é calculada recorrendo ao pé direito do piso, equivale 275,3 m<sup>2</sup> em cada piso e a 826,0 m<sup>2</sup> no somatório dos três pisos.

Tabela 9 - Composição considerada para a parede pertencente à envolvente interior do edifício (Pina dos Santos & Matias, 2006).

Composição	Espessura [m]
Gesso (estruque) tradicional	0,04
Alvenaria tijolo furado	0,11
$\sum_j$ Espessura	0,15

### 3.4.4. Transmissão térmica através da envolvente do edifício

A transferência de calor que ocorre entre o espaço climatizado e o ambiente envolvente, é caracterizada através do coeficiente de transmissão térmica (U) dos elementos que fazem de fronteira entre as duas regiões. O coeficiente U dos vários elementos opacos que compõem tanto a envolvente exterior, sem contar com elementos envidraçados, como a interior, são determinados, de acordo com a norma europeia EN ISO 6946, pela equação (3-2) em W/m<sup>2</sup>.°C,

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \quad (3-2)$$

onde  $R_j$  equivale à resistência térmica da camada  $j$  do elemento em  $m^2 \cdot ^\circ C/W$ , uma vez que os elementos da envolvente são constituídos por vários materiais, em camadas de espessura constante.  $R_{si}$  e  $R_{se}$  representam as resistências térmicas superficiais interior e exterior, respetivamente em  $m^2 \cdot ^\circ C/W$ .

Os valores das resistências térmicas dos vários materiais que compõem os elementos da envolvente são obtidos, de acordo com o Despacho n.º 15793-K/2013 de Dezembro, através da consulta da publicação do LNEC ITE 50 de Pina dos Santos & Matias (2006).

O documento do LNEC consultado nem sempre fornece o valor direto da resistência térmica do material. Quando tal não acontece o valor da condutibilidade térmica do material é fornecido e através da equação (3-3) é possível obter o valor da resistência pretendida em função da espessura da camada ( $e$ ) em metros, e da condutibilidade do material ( $\lambda$ ) em  $W/m \cdot ^\circ C$ .

$$R_j = \frac{e}{\lambda} \quad (3-3)$$

Os valores obtidos das resistências térmicas dos diferentes materiais que compõem os elementos considerados para a envolvente exterior, ou seja, parede dupla exterior, cobertura do piso 2, pavimento do piso 0, encontram-se representados, respetivamente nas Tabela A 3.

Tabela A 4 e Tabela A 5 do Anexo 2, assim como os respetivos coeficientes  $U$  calculados. Os elementos considerados da envolvente interior equivalem às paredes interiores do edifício. Da mesma forma, os valores das resistências térmicas assim como o seu coeficiente  $U$ , encontram-se na Tabela A 6 do Anexo 3.

A Tabela 10 resume os valores dos coeficientes de transmissão térmica em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ , obtidos para os diferentes elementos da envolvente do edifício, referidos no paragrafo anterior.

Tabela 10 – Coeficientes de transmissão térmica calculados, para os diferentes elementos da envolvente.

<b>Envolvente</b>	<b>Elemento</b>	<b>U [W/m<sup>2</sup>·°C]</b>
Exterior	Parede dupla exterior	0,460
	Cobertura do Piso 2	0,651
	Pavimento do Piso 0	0,600
Interior	Paredes interiores	1,587

O capítulo seguinte demonstra a metodologia utilizada para a obtenção das cargas térmicas do edifício em estudo, tendo em conta as características apresentadas ao longo do Capítulo 3.

## 4. Demonstração e aplicação da metodologia

Para um dimensionamento do sistema de Bomba de Calor Geotérmico numa fase conceptual é necessário em primeiro lugar determinar quais as cargas térmicas do edifício que o sistema irá substituir. Por forma, a efetuar uma quantificação adequada às cargas térmicas do edifício em estudo, foi utilizado o regulamento em vigor, Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), que estabelece os requisitos para os edifícios de habitação, novos ou sujeitos a intervenções, bem como os parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético, em condições nominais, de todos os edifícios de habitação e dos seus sistemas técnicos, no sentido de promover a melhoria do respetivo comportamento térmico e a eficiência dos seus sistemas técnicos. Sendo assim é possível quantificar as necessidades de energia útil para aquecimento, arrefecimento e necessidades de água quente sanitária do edifício em estudo, através das características climáticas do local e físicas do edifício.

É difícil avaliar o comportamento complexo interno térmico de um edifício/piso para a necessidade de uma zona individual, pois nesse caso são necessários muitos dados de input detalhados, os quais não estão facilmente disponíveis. Sendo assim para esta análise é muito importante utilizar um modelo robusto simples que não requer um número elevado de inputs. A abordagem a seguir é considerar o edifício como um todo, ou seja, um “bloco”. Esta abordagem é uma boa aproximação do que acontece nos edifícios residências, principalmente os que estão equipados com um sistema de aquecimento central, conduzindo assim a uma estimativa mais robusta (RETScreen, 2015).

A carga térmica do “bloco” refere-se à carga de pico que ocorre no edifício/piso num determinado momento em condições de temperatura de dimensionamento. Por exemplo um edifício/piso com várias zonas, ou seja, com termostatos independentes, o somatório das cargas térmicas de arrefecimento de cada zona pode exceder a carga térmica de arrefecimento do bloco, pois existem diferentes taxas de ocupação, ganhos solares assim como outros fatores (RETScreen, 2015). Para um edifício residencial as cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento representam normalmente o somatório de todas as cargas das diferentes divisões nas mesmas condições de projeto. A utilização da abordagem de “bloco”, também utilizada por Carvalho et al. (2015), permite tratar todo o edifício como uma zona simples com apenas uma temperatura de ar interior. Sendo assim a área útil do edifício, considerada para a determinação da carga térmica necessária nas diferentes estações do ano, equivale ao somatório dos espaços a climatizar por piso representados na Tabela 5. O somatório dos espaços a climatizar para os três pisos tem o valor de 839 m<sup>2</sup>.

### 4.1. Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento ( $N_{ic}$ )

A metodologia utilizada para a determinação das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento,  $N_{ic}$ , do Apartamentado da Amadora, segue o Despacho (extrato) nº 15793-I/2013 nos termos do Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto e respetiva regulamentação, o qual foi transposto de acordo com Norma Europeia, EN ISO 13790:2008.

De forma a obter do valor de  $N_{ic}$ , são feitas três considerações importantes segundo o Despacho utilizado:

- Utilização do método sazonal para o cálculo das necessidades de aquecimento do edifício e as adaptações necessárias permitidas segundo a norma EN ISO 13790:2008;
- Cada edifício e/ou fração autónoma do edifício é tratada como uma única zona, com as mesmas condições interiores de referência;
- Os fenómenos que ocorrem integrados ao longo da estação de aquecimento, são tratados em regime permanente ou estado estacionário.

A equação (4-1) permite calcular o valor das necessidades nominais anuais de energia útil ( $N_{ic}$ ) em kWh/m<sup>2</sup>.ano, na estação de aquecimento, tendo em conta as perdas e ganhos de calor no edifício,

$$N_{ic} = \frac{(Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i})}{A_p} \quad (4-1)$$

onde  $Q_{tr,i}$  representa a transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento através da envolvente dos edifícios em kWh,  $Q_{ve,i}$  representa a transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento em kWh,  $Q_{gu,i}$  representa os ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento resultantes dos ganhos solares através dos vãos envidraçados, da iluminação, dos equipamentos e dos ocupantes também em kWh. O termo  $A_p$  é a área interior útil de pavimento do edifício medida em m<sup>2</sup>.

#### 4.1.1. Cálculo da transferência de calor por transmissão através da envolvente ( $Q_{tr,i}$ )

A transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento através da envolvente do edifício, ocorre devido à diferença de temperatura que existe entre o interior e o exterior deste. De acordo com o Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013 é calculado através da equação (4-2) em kWh,

$$Q_{tr,i} = 0,024 \cdot GD \cdot H_{tr,i} \quad (4-2)$$

onde GD representa o número de graus-dias de aquecimento especificados para a região da Amadora em °C.dia, onde o *software RETScreen* utilizado permite obter um valor anual de 923 °C.dia. O termo  $H_{tr,i}$  representa o coeficiente global de transferência de calor por Transmissão e tem como unidades W/°C.

##### 4.1.1.1. Coeficiente global de transferência de calor por transmissão ( $H_{tr,i}$ )

O parâmetro térmico  $H_{tr,i}$  da equação (4-2), representa o coeficiente global de transferência de calor por Transmissão, que engloba a condutância através de toda a superfície dos elementos da envolvente, abrangendo paredes, envidraçados, coberturas, pavimentos e pontes térmicas planas e lineares.

O cálculo do referido parâmetro, na estação de aquecimento, segue o mesmo princípio indicado no Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013 referente ao Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto. Este parâmetro resulta da soma de quatro parcelas, como demonstrado através da equação (4-3),

$$H_{tr,i} = H_{ext} + H_{enu} + H_{adj} + H_{ecs} \quad (4-3)$$

onde  $H_{ext}$  é a parcela referente ao coeficiente de transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com o exterior em  $W/^\circ C$ ,  $H_{enu}$  representa o coeficiente de transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com espaços não úteis em  $W/^\circ C$ ,  $H_{adj}$  traduz o coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contacto com edifícios adjacentes em  $W/^\circ C$  e por fim a quarta parcela  $H_{ecs}$  é referente ao coeficiente de transferência de calor através dos elementos em contacto com o solo em  $W/^\circ C$ .

O Despacho precedente faculta todas as equações necessárias para o cálculo das quatro diferentes parcelas que compõem a equação (4-3). O método de cálculo das referidas parcelas é demonstrado nas alíneas que se seguem.

- a) O coeficiente de transferência de calor por transmissão através da envolvente exterior é calculado em  $W/^\circ C$ , de acordo com a equação (4-4),

$$H_{ext} = \sum_i [U_i A_i] + \sum_j [\psi_j B_j] \quad (4-4)$$

onde  $U_i$  representa o coeficiente de transmissão térmica do elemento  $i$  da envolvente exterior em  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , os quais podem ser consultados na Tabela 10.  $A_i$  diz respeito à área do elemento  $i$  da envolvente medida da parte interior do edifício em  $m^2$ ,  $\psi_j$  representa o coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear  $j$  em  $W/(m \cdot ^\circ C)$ , e  $B_j$  representa o desenvolvimento linear em metros da ponte térmica linear  $j$ , medido pela parte interior do edifício.

O cálculo do coeficiente de transmissão térmica  $U$  das paredes do edifício em estudo em contacto com o exterior, obtido na Tabela 10, tem o valor de  $0,460 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ . No entanto para obter esse valor não são tomadas em consideração as zonas não correntes da parede exterior como, pilares, vigas, caixas de estore e outras heterogeneidades. Sendo impossível obter informação detalhada relativamente à ausência ou contribuição das zonas não correntes do edifício, considera-se a regra de simplificação, segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013 do Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto, que permite, nesta situação, dispensar a determinação rigorosa das áreas e dos coeficientes de transmissão térmica das zonas de pilares, vigas, caixas de estore e outras heterogeneidades, podendo-se considerar para os referidos elementos o coeficiente de transmissão térmica determinado para a zona corrente, agravado em 35 %. Assim, o valor do coeficiente de transmissão térmica  $U$  calculado na Tabela A 3 do Anexo 2, toma o valor de  $0,622 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .

A Tabela 11 apresenta os resultados do cálculo da primeira parcela da equação (4-4), recorrendo às áreas dos elementos da envolvente obtidas no subcapítulo 3.4.2. Note-se que apesar de se considerar anteriormente no subcapítulo 3.4.2, o pavimento do piso 0 um elemento da envolvente exterior, este não entra no cálculo da primeira parcela da equação (4-4), pois apresenta outro método de cálculo abordado mais adiante na alínea c). Sendo assim, o somatório tem o valor de  $519 W/^\circ C$  para todo o edifício.

Tabela 11 – Cálculo da primeira parcela da equação (4-4).

<b>Elemento</b>	<b>U</b> [W/m <sup>2</sup> .°C]	<b>Área</b> [m <sup>2</sup> ]	<b>U.A</b> [W/°C]
Parede dupla exterior	0,622	542,0	337
Cobertura do Piso 2	0,651	279,8	182
		$\sum_i [U_i A_i]$	519

Relativamente à segunda parcela da equação (4-4), a obtenção dos coeficientes de Transmissão térmica linear  $\psi$  das diferentes zonas de ponte térmica linear, existentes entre o edifício e a envolvente exterior, são obtidos a partir do Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013, de uma forma simplificada como pode ser observado na Tabela A 1 do Anexo 1 retirada do referido Despacho. As zonas de ponte térmica linear consideradas, de acordo com a Tabela A 1 do Anexo 1, para os diferentes pisos do edifício em estudo encontram-se descritas na Tabela 12.

Tabela 12 - Pontes térmicas lineares das envolventes exteriores consideradas para os diferentes Pisos.

<b>Piso</b>	<b>Tipo de Ligação</b>	<b>B</b> [m]	<b><math>\psi</math></b> [W/m.°C]	<b><math>\psi.B</math></b> [W/°C]
2	Paredes Verticais	51,3	0,4	20,5
	Fachadas c/ Pavimentos. Intermédios	167,2	0,5	83,6
1	Paredes Verticais	51,3	0,4	20,5
	Fachadas c/ Pavimentos. Intermédios	167,2	0,5	83,6
0	Paredes Verticais	51,3	0,4	20,5
	Fachadas c/ Pavimentos Intermédios	83,6	0,5	41,8
	Fachadas c/ Pavimentos Térreos	83,6	0,8	66,9
			$\sum_i [\psi_i . B_i]$	337,4

As medidas descritas na Tabela 12, dos diferentes desenvolvimentos lineares B, são obtidas recorrendo à planta representada na Figura 20. Nesta as paredes verticais consideradas encontram-se destacadas com um círculo verde, são 19 no total e cada uma com uma altura igual ao pé direito



do piso do edifício (2,7 m), o somatório das mesmas equivale a 51,3 m em cada piso, como se pode observar na Tabela 12. O valor de 83,6 m que pode ser observado na Tabela 12, é obtido através do somatório das medidas representadas a cor de laranja da Figura 20, que representam o desenvolvimento linear das fachadas com pavimento. No caso dos pisos 1 e 2 esse valor é a dobrar (167,2 m), pois estes pisos encontram-se separados por dois pavimentos.

Sendo assim, o valor da segunda parcela da equação (4-4) obtido é de 337,4 W/°C para todo o edifício, como se pode observar na Tabela 12.

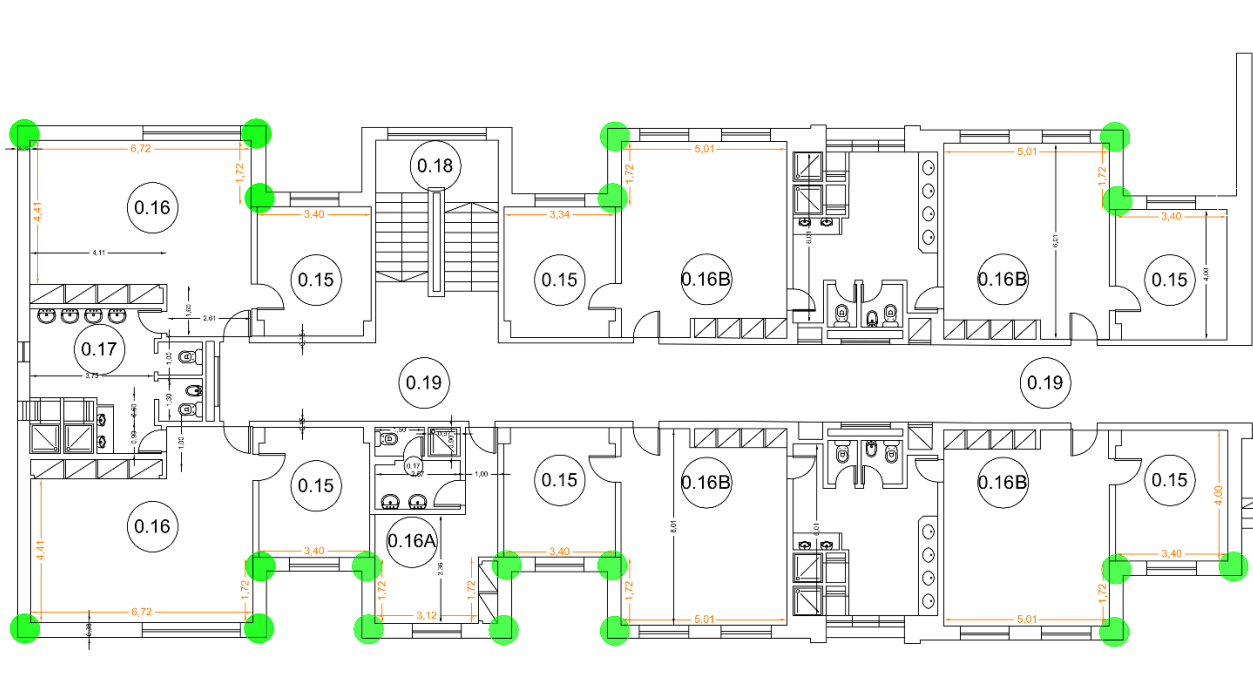


Figura 20 - Planta do Piso 0, equivalente no Piso 1 e 2. Representação das pontes térmicas lineares consideradas, pertencentes à envolvente exterior. Paredes Verticais (destacadas com um círculo verde), e Fachadas com Pavimentos (representadas a cor de laranja, medidas em metros). Figura adaptada da planta do projeto de execução do edifício do alojamento de alunos da Academia Militar destacamento da Amadora.

Obtidos os valores dos termos necessários para o cálculo da equação (4-4), é possível chegar ao valor de 856,4 W/°C do coeficiente de transferência de calor por transmissão através da envolvente exterior,  $H_{ext}$ , necessário para o cálculo da equação (4-3).

- b) Os coeficientes de transferência de calor por transmissão através da envolvente em contacto com espaços não úteis,  $H_{emu}$ , ou em contacto com edifícios adjacentes,  $H_{adj}$ , são calculados em W/°C, de acordo com a equação (4-5),

$$H_{emu,adj} = b_{tr} \left( \sum_i [U_i A_i] + \sum_i [\psi_i B_i] \right) \quad (4-5)$$

onde  $b_{tr}$ , representa o coeficiente de redução de perdas de determinado espaço não útil ou edifício adjacente. A obtenção do valor de  $b_{tr}$  pode ser obtido segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-

E/2013 de uma forma simplificada, considerando que todos os elementos de construção pertencentes à envolvente interior separam o espaço útil de espaços fechados de um edifício adjacente, ou seja, o cálculo de  $H_{emu}$  é desprezado. Para o cálculo de  $H_{adj}$ ,  $b_{tr}$  toma o valor de 0,60.

O cálculo das pontes térmicas lineares nas paredes pertencentes à envolvente interior não é contabilizado, uma vez que a condição  $b_{tr} \leq 0,7$  se confirma, segundo o Despacho n.º 15793-K/2013. Sendo assim, a segunda parcela da equação (4-5) é considerada nula, e o valor final da equação (4-5) é obtido tendo em conta: a área total da parede interior do edifício de 826 m<sup>2</sup> - retirada do subcapítulo 3.4.3, o valor do coeficiente U de 1,587 W/m<sup>2</sup>.°C - retirado da Tabela 10, e o valor considerado anteriormente para  $b_{tr}$  de 0,6. Deste modo, o resultado final de  $H_{adj}$  é 786,6 W/°C.

- c) A obtenção do valor do coeficiente de transferência de calor por transmissão através do elemento em contacto com o solo,  $H_{ecs}$ , em W/°C, é efetuada de acordo com a equação (4-6),

$$H_{ecs} = \left( \sum_i [U_{bf,i} \cdot A_i] + \sum_j [z_j \cdot P_j \cdot U_{bw,j}] \right) \quad (4-6)$$

onde  $U_{bf,i}$  representa o coeficiente de transmissão térmica em W/m<sup>2</sup>.°C do pavimento enterrado i, que no caso de estudo é o pavimento do piso 0.  $A_i$  representa a área do pavimento i, medida em m<sup>2</sup> no interior do edifício, em contacto com o solo. O termo  $z_j$  diz respeito à profundidade média enterrada da parede em contacto com o solo j, em metros.  $P_j$  representa o desenvolvimento total da parede em contacto com o solo j, medido no interior do edifício, em metros. Finalmente,  $U_{bw,j}$  é o coeficiente de transmissão térmica da parede em contacto com o solo j, em W/m<sup>2</sup>.°C.

Considera-se para o caso de estudo que o pavimento térreo em que se encontra o edifício está ao mesmo nível do pavimento do piso 0, logo o cálculo da equação (4-6) é resumido à primeira parcela visto que a condição  $z = 0$  se verifica.

O valor do coeficiente de transmissão térmica superficial no pavimento em contacto com o solo,  $U_{bf}$ , é obtido através da Tabela A 2 do Anexo 1, retirada do Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013. Sabendo o valor de 1,28 m<sup>2</sup>.°C/W da resistência térmica do pavimento do piso 0 em contacto com o solo, calculado através da Tabela A 5 do Anexo 2, é possível obter o valor de  $U_{bf}$  igual a 0,60 W/m<sup>2</sup>.°C uma vez que obedece a condição da Tabela A 2 do Anexo 1,  $R_f \geq 0,75$  para  $z < 1$ .

Uma vez mais é necessário recorrer ao subcapítulo 3.4.2, de forma a obter a área interior do piso de 279,8 m<sup>2</sup>, e assim calcular o valor final  $H_{ecs}$  da equação (4-6), onde se obtém o valor 167,9 W/°C.

Obtidos os valores das diferentes parcelas que compõem a equação (4-3), demonstrados nas alíneas anteriores e resumidos na Tabela 13, é possível observar que o somatório de todas essas parcelas perfaz o valor final do coeficiente global de transferência de calor por transmissão,  $H_{tr}$ , de 1810,9 W/°C.

Tabela 13 – Valores obtidos nas alíneas a), b) e c), dos coeficientes de transferência de calor necessários para o cálculo da equação (4-3).

Alínea	Coefficiente global de transferência de calor por transmissão	Valor obtido [W/°C]
a)	Através da envolvente exterior ( $H_{ext}$ )	856,4
b)	Através da envolvente em contacto com edifícios adjacentes ( $H_{adj}$ )	786,6
c)	Através do elemento em contacto com o solo ( $H_{ecs}$ )	167,9

Tendo obtido anteriormente o valor total de  $H_{tr}$ , é possível assim finalizar a equação (4-2) de forma a obter o valor da quantidade de calor necessária para compensar todas as perdas através da envolvente do edifício, na estação de aquecimento,  $Q_{tr}$ . Assim, o valor obtido para a equação (4-2) do subcapítulo 4.1.1 é de 40,16 MWh.

#### 4.1.2. Cálculo da transferência de calor por renovação do ar ( $Q_{ve,i}$ )

As perdas de calor que ocorrem na renovação do ar interior do edifício, são também conhecidas como perdas de calor por ventilação. Esta quantidade de transferência de calor é calculada, na estação de aquecimento, de acordo com o Despacho (extrato) nº 15793-I/2013 através da equação (4-7) em kWh,

$$Q_{ve,i} = 0,024 \cdot GD \cdot H_{ve,i} \quad (4-7)$$

onde  $H_{ve}$  representa o coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento, e é calculado segundo a equação (4-8) em W/°C,

$$H_{ve,i} = 0,34 \cdot R_{ph,i} \cdot A_p \cdot P_d \quad (4-8)$$

em que  $A_p$  representa a área interior útil de pavimento, relativo aos 3 pisos do edifício, a qual medida pelo interior tem o valor de 839,0 m<sup>2</sup> como obtido no subcapítulo 3.4.1. O termo  $P_d$  representa o pé direito de cada piso, com o valor de 2,7 m. A taxa nominal de renovação do ar interior na estação de aquecimento é dada em h<sup>-1</sup>, e representa-se pelo termo  $R_{ph,i}$ . O valor considerado para  $R_{ph}$  é de 0,4 renovações por hora. Este valor equivale ao mínimo de renovações por hora, de acordo com a disposição prevista para o efeito em despacho do Diretor-Geral de Energia e Geologia, segundo a consulta da Portaria n.º 349-B/2013 de 29 de novembro.

O valor obtido para  $H_{ve}$ , segundo a equação (4-8) é de 308,2 W/°C. Sendo assim, sabendo o valor de graus-dias de aquecimento para região, 923 °C.dia, é possível completar a equação (4-7) e obter a

quantidade de calor necessária para compensar todas as perdas de calor por renovação do ar. O valor final obtido para a equação (4-7) é de 6,83 MWh.

#### 4.1.3. Cálculo dos ganhos térmicos úteis ( $Q_{gu,i}$ )

A obtenção da quantidade de energia térmica proveniente dos ganhos térmicos brutos, que se traduzem em ganhos térmicos úteis é feita de acordo com o Despacho (extrato) nº 15793-I/2013, através da equação em kWh,

$$Q_{gu,i} = \eta_i \cdot Q_{g,i} \quad (4-9)$$

onde  $\eta_i$  representa o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento. Para o caso de estudo o fator de utilização é obtido de acordo com a metodologia descrita no Anexo 4, retirado do Despacho n.º 15793-K/2013.

O termo  $Q_{g,i}$  da equação (4-9) representa os ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento, em kWh, considerados para o cálculo das necessidades nominais de aquecimento do edifício. Estes ganhos provêm de fontes diferentes conforme demonstrado nas duas parcelas que compõem a equação (4-10), onde o termo  $Q_{int,i}$  representa os ganhos térmicos associados às várias fontes de calor internas, e  $Q_{sol,i}$  os ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos diferentes vãos envidraçados.

$$Q_{g,i} = Q_{int,i} + Q_{sol,i} \quad (4-10)$$

##### 4.1.3.1. Ganhos térmicos internos ( $Q_{int,i}$ )

Os ganhos térmicos internos considerados abrangem as fontes de calor situadas nas áreas a aquecer, particularmente os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes, e o calor dissipado dos equipamentos e dos dispositivos de iluminação. O ganho térmico associado ao sistema de aquecimento não é considerado, de acordo com Despacho (extrato) nº 15793-I/2013. O cálculo dos ganhos térmicos internos, durante a estação de aquecimento, podem ser obtidos de acordo com equação (4-11), em kWh,

$$Q_{int,i} = 0,72q_{int} \cdot M \cdot A_p \quad (4-11)$$

onde o termo  $q_{int}$ , traduz os ganhos térmicos internos médios por unidade de superfície, e toma o valor de 4 W/m<sup>2</sup> segundo o Despacho (extrato) nº 15793-I/2013. O termo M, representa a duração média, em meses, da estação convencional de aquecimento para a região da Amadora, em que para a qual foi considerado o valor de referência de 5,3 meses, de acordo com o Despacho (extrato) n.º15793-F/2013. Por fim, o termo  $A_p$ , representa a área interior útil de pavimento do edifício, medida pelo interior, obtida anteriormente no subcapítulo 3.4.3 e com o valor de 826,0 m<sup>2</sup>.

Tendo em conta os valores obtidos no parágrafo anterior, para os diferentes termos da equação (4-11), obtém-se o valor de 12,81 MWh para  $Q_{int}$ .

#### 4.1.3.2. Ganhos térmicos solares (Qsol,i)

Os ganhos solares resultam da radiação solar que incide através dos vãos envidraçados na estação de aquecimento, são obtidos de acordo com a regulamentação presente no Despacho (extrato) nº 15793-I/2013, através da equação (4-12), em kWh,

$$Q_{sol,i} = G_{sul} \cdot \sum_j \left[ X_j \cdot \sum_n F_{s,inj} \cdot A_{s,inj} \right] \cdot M \quad (4-12)$$

em que:

- $G_{sul}$  é o valor médio mensal de energia solar, na estação de aquecimento, que incide numa superfície vertical orientada a Sul por unidade de superfície. De acordo com o Despacho (extrato) nº 15793-I/2013, as superfícies são consideradas verticais quando apresentam inclinação superior a 60° face ao plano horizontal. O valor de  $G_{sul}$  é de 150 kWh/m<sup>2</sup>.mês para a região da Amadora, conforme o Despacho (extrato) nº 15793-I/2013.
- O termo  $X_j$ , representa o fator de orientação para as diferentes exposições de acordo com a
- Tabela A 10 do Anexo 5 retirada do Despacho (extrato) nº 15793-I/2013.
- O termo  $F_{s,inj}$  corresponde ao fator de obstrução de cada uma das superfícies envidraçadas “n” em cada uma das orientações “j”, onde se dispensa a avaliação rigorosa dos ângulos formados por elementos horizontais ou verticais sobrepostos aos vãos envidraçados, como palas, varandas, outros elementos do mesmo edifício, e por elementos que contribuem para a obstrução do horizonte. Sendo assim,  $F_{s,inj}$  tem o valor de 0,45 de acordo com o Despacho (Extrato) nº 15793-E/2013 de 3 de dezembro, assumindo que os envidraçados não estão orientados a Norte e com obstruções do horizonte ou palas que conduzam a um ângulo de obstrução inferior ou igual a 45°.
- A área efetiva coletora de radiação solar da superfície envidraçada “n” com orientação “j”, representa-se por  $A_{s,inj}$ , e é calculada vão a vão de acordo com a equação (4-13), em m<sup>2</sup>,

$$A_{s,inj} = A_w \cdot F_{g,i} \cdot g_{vi} \quad (4-13)$$

onde  $A_w$  equivale à área total do vão envidraçado, incluindo o vidro e caixilho, em m<sup>2</sup>. O termo  $F_{g,i}$  representa a fração envidraçada do vão envidraçado, e toma o valor de 0,7, efetuando as mesmas considerações que para  $F_{s,i}$  no ponto anterior. Finalmente o termo  $g_{vi}$  representa o fator solar do vidro. Para efeito de ganhos térmicos através dos vãos envidraçados, tanto na estação de aquecimento como na de arrefecimento, é possível considerar uma incidência da radiação solar normal à superfície do vão, corrigida de um fator  $F_w$ , que traduz a variação dessa incidência consoante a orientação, como se representa na equação (4-14).

$$g_{vi} = F_w \cdot g_{\perp,vi} \quad (4-14)$$

Por outras palavras, o fator de correção da seletividade angular dos envidraçados,  $F_w$ , traduz a redução dos ganhos solares causada pela variação das propriedades do vidro com o ângulo de incidência da radiação solar direta. Para o cálculo das necessidades nominais de aquecimento, o fator  $F_w$  toma o valor 0,9 de acordo com o Despacho nº 15793-K/2013 de 3 de dezembro.

Para obter o fator solar do vidro, para uma incidência solar normal à superfície,  $g_{\perp,vi}$ , utiliza-se a Tabela A 11 do Anexo 5, retirada do Despacho n.º 15793-K/2013 de 3 de dezembro. A referida Tabela faculta os valores do fator solar  $g_{\perp,vi}$  de várias composições típicas de vidros. Para o caso de estudo o vidro considerado é o refletante incolor de 4 a 8 mm, com o fator de 0,6 pois é o que mais se assemelha às características observadas do vidro no local.

O cálculo dos vários termos da equação (4-12), que traduz os ganhos solares térmicos nas diferentes orientações dos vãos envidraçados, encontram-se resumidos na Tabela A 12 do Anexo 5 para cada piso do edifício. Esses termos são efetuados de acordo com todos os parâmetros esclarecidos no subcapítulo anterior, para todos os vãos envidraçados presentes na envolvente exterior. Todos os vãos envidraçados considerados são de igual área. Sendo assim, o valor final obtido para  $Q_{sol}$  do edifício é de 7,77 MWh. O seu cálculo pode ser observado na Tabela A 13 do Anexo 5.

Tendo anteriormente obtido os valores dos termos necessários para o cálculo da quantidade de energia térmica proveniente dos ganhos térmicos brutos, equação (4-10), estes representam 20,58 MWh de energia térmica na estação de aquecimento. De modo a obter o valor dos ganhos térmicos uteis ( $Q_{gu,i}$ ), equação (4-9), é necessário calcular o termo do fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento ( $\eta_i$ ). O termo  $\eta_i$  é calculado seguindo a metodologia descrita no Anexo 4, o valor obtido é de 0,93 como demonstrado na Tabela A 8 do referido Anexo. Sendo assim, valor de ( $Q_{gu,i}$ ) obtido é de 19,15 MWh, e o seu cálculo pode ser observado na Tabela A 13 do Anexo 5.

Por fim, uma vez obtidos todos os termos necessários para o cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil ( $N_{ic}$ ), os quais têm em conta todas as perdas e ganhos de calor no edifício, resumidos na Tabela 14, obtém-se assim o valor de 33,17 kWh/m<sup>2</sup>.ano segundo a equação (4-1).

Tabela 14 – Termos calculados, necessários para a obtenção de  $N_{ic}$ .

<b>Equação</b>	<b>Termo calculado</b>	<b>Energia [MWh]</b>
(4-2)	Perdas de calor através da envolvente do edifício ( $Q_{tr,i}$ )	40,16
(4-7)	Perdas de calor por ventilação ( $Q_{ve,i}$ )	6,83
(4-9)	Ganhos térmicos uteis ( $Q_{gu,i}$ )	19,15

## 4.2. Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento ( $N_{vc}$ )

A determinação das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento,  $N_{vc}$ , do edifício em estudo, foi efetuada recorrendo à mesma metodologia utilizada anteriormente na determinação das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento,  $N_{ic}$ . A metodologia segue o Despacho (extrato) nº 15793-I/2013 nos termos do Decreto-Lei n.º 118/2013, e respetivas considerações referidas anteriormente no subcapítulo (4.1).

Sendo assim, a equação (4-15) permite calcular o valor das necessidades nominais anuais de energia útil ( $N_{vc}$ ) em kWh/m<sup>2</sup>.ano, na estação de arrefecimento, tendo em conta os ganhos térmicos no edifício,

$$N_{vc} = \frac{(1 - \eta_v)Q_{g,v}}{A_p} \quad (4-15)$$

onde  $Q_{g,v}$  representa os ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento em kWh, e  $\eta_v$  o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento.

O termo  $\eta_v$  é obtido através da metodologia descrita no Anexo 4, da mesma forma que  $\eta_i$  no subcapítulo (4.1.3). A metodologia de cálculo de  $\eta_v$  é aplicada em função das transferências de calor ao longo da estação de arrefecimento que ocorrem quer por transmissão ( $Q_{tr,v}$ ), devido à renovação do ar ( $Q_{ve,v}$ ), quer através dos ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento ( $Q_{g,v}$ ). As transferências de calor que ocorrem serão obtidas nos subcapítulos que se seguem.

### 4.2.1. Cálculo da transferência de calor por transmissão através da envolvente ( $Q_{tr,v}$ )

O cálculo da transferência de calor que ocorre por transmissão através da envolvente na estação de arrefecimento, segue mais uma vez o Despacho (extrato) nº 15793-I/2013. O cálculo é efetuado através da equação (4-16) em kWh,

$$Q_{tr,v} = \frac{H_{tr,v} \cdot (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \cdot L_v}{1000} \quad (4-16)$$

onde  $\theta_{v,ref}$  representa a temperatura de referência para o cálculo das necessidades de energia na estação de arrefecimento, que toma o valor de 25 °C segundo o Despacho (extrato) nº 15793-I/2013. O termo  $\theta_{v,ext}$  representa a temperatura média do ar exterior na estação de arrefecimento, onde o *software RETScreen* utilizado permite obter um valor de 22,3 °C. O termo  $L_v$  representa a duração da estação de arrefecimento em horas, que através do Despacho utilizado toma o valor 2928 horas. O termo  $H_{tr,v}$  representa o coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de arrefecimento, o qual toma o mesmo valor obtido anteriormente para a estação de aquecimento,  $H_{tr,i}$ , 1810,9 W/°C, calculado através da equação (4-3) com os valores obtidos na Tabela 13.

Conhecendo todos os termos necessários para concluir o resultado da equação (4-16), obtém-se assim para o edifício em estudo 14,32 MWh como valor de  $Q_{tr,v}$ .

#### 4.2.2. Cálculo da transferência de calor por renovação do ar ( $Q_{ve,v}$ )

A quantidade de transferência de calor que ocorre na renovação do ar interior do edifício é calculada na estação de arrefecimento de acordo com o Despacho (extrato) nº 15793-I/2013, através da equação em (4-17) kWh,

$$Q_{ve,v} = \frac{H_{ve,v} \cdot (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \cdot L_v}{1000} \quad (4-17)$$

onde o termo  $H_{ve,v}$  representa o coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento, o qual toma o mesmo valor obtido na estação de aquecimento,  $H_{ve,i}$ , 308,2 W/°C, determinado anteriormente através da equação (4-8) do subcapítulo (4.1.2).

Tendo em conta os termos em comum com a equação (4-16), o resultado obtido para  $Q_{ve,v}$  é de 2,44 MWh.

#### 4.2.3. Cálculo dos ganhos térmicos brutos ( $Q_{g,v}$ )

O cálculo dos ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento é obtido através da equação (4-18), similar à utilizada na estação de aquecimento no subcapítulo (4.1.3), equação (4-10). Na equação estão incluídos os ganhos térmicos associados às várias fontes internas de calor ( $Q_{int,v}$ ) e à radiação incidente na envolvente exterior opaca e envidraçada ( $Q_{sol,v}$ ).

$$Q_{g,v} = Q_{int,v} + Q_{sol,v} \quad (4-18)$$

##### 4.2.3.1. Ganhos térmicos internos ( $Q_{int,v}$ )

Os ganhos térmicos internos durante a estação de arrefecimento são obtidos de acordo com o Despacho (extrato) nº 15793-I/2013, através da equação (4-19). Do mesmo modo que no cálculo efetuado anteriormente na estação de aquecimento, equação (4-11) do subcapítulo (4.1.3.1), o termo  $q_{int}$  toma o valor de 4 W/m<sup>2</sup> e  $A_p$  tem o valor de 826 m<sup>2</sup>.

$$Q_{int,v} = \frac{q_{int} \cdot A_p \cdot L_v}{1000} \quad (4-19)$$

Tendo em conta a duração da estação de arrefecimento, que equivale a 2928 horas, a equação (4-19) permite obter o valor de 9,83 MWh para  $Q_{int,v}$ .

##### 4.2.3.2. Ganhos térmicos solares ( $Q_{sol,v}$ )

Os ganhos solares na estação de arrefecimento resultam da radiação solar que incide em toda a envolvente exterior, envolvente opaca e vãos envidraçados, diferente dos ganhos solares na estação de aquecimento definidos anteriormente no subcapítulo (4.1.3.2), onde de acordo com a regulamentação utilizada apenas são considerados os vãos envidraçados. A equação (4-20) traduz o



cálculo dos ganhos solares na estação de arrefecimento, em kWh, de acordo com a regulamentação presente no Despacho (extrato) nº 15793-I/2013,

$$Q_{sol,v} = \sum_j \left[ I_{sol,j} \cdot \sum_n F_{s,vnj} \cdot A_{s,vnj} \right] \quad (4-20)$$

onde o termo  $I_{sol,j}$  representa a energia solar acumulada durante a estação de arrefecimento, em kWh/m<sup>2</sup>, para cada uma das orientações “j” na região da Amadora. Os diferentes valores de  $I_{sol,j}$  podem ser consultados na Tabela A 14 do Anexo 6, retirada do Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, 3 de Dezembro 2013. O termo  $A_{s,vnj}$  representa a área efetiva coletora de radiação solar da superfície da envolvente exterior “n” com orientação “j” na estação de arrefecimento, a sua forma de cálculo para os vãos envidraçados e para a envolvente opaca é definida nas alíneas a) e b), respetivamente de acordo com o Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013.

- a) A área efetiva coletora de radiação solar da superfície envidraçada “n” com orientação “j” na estação de arrefecimento, é efetuada utilizando a mesma equação empregue para o cálculo na estação de aquecimento, equação (4-13). A substituição da equação (4-13) na equação (4-20), permite obter a equação (4-21), que traduz o valor dos ganhos solares através dos vãos envidraçados na estação de arrefecimento.

$$Q_{sol,v} = \sum_j \left[ I_{sol,j} \cdot \sum_n F_{s,vnj} \cdot A_w \cdot F_g \cdot g_{vi} \right] \quad (4-21)$$

O cálculo da equação (4-21) encontra-se resumido na Tabela A 15 do Anexo 6, para cada piso do edifício. Os termos  $A_w$  e  $g_{vi}$  tomam os mesmos valores obtidos anteriormente na estação de aquecimento, representados na Tabela A 12 do Anexo 5. Da mesma forma que na estação de aquecimento, não é necessário a avaliação rigorosa dos ângulos formados por elementos horizontais ou verticais sobrepostos aos vãos envidraçados, como palas, varandas, outros elementos do mesmo edifício, e por elementos que contribuem para a obstrução do horizonte. Sendo assim o produto de  $F_{s,vnj} \cdot F_g$  toma o valor de 0,56, segundo o Despacho (extrato) N.º 15793-E/2013 de 3 de dezembro.

- b) A área efetiva coletora de radiação solar da superfície “n” da envolvente exterior opaca, com orientação “j”, na estação de arrefecimento, é efetuada através da equação (4-22), de acordo com o Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013,

$$A_{s,vnj} = \alpha \cdot U \cdot A_{op} \cdot R_{se} \quad (4-22)$$

onde o termo  $\alpha$  representa o coeficiente de absorção de radiação solar da superfície dos elementos da envolvente exterior opaca. Através da observação da Figura 16 é possível constatar que a envolvente exterior do edifício é de uma cor Clara, sendo assim,  $\alpha$  toma o valor de 0,4 segundo a Tabela A 16 do Anexo 6, retirada do Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, 3 de Dezembro 2013. O termo U representa o coeficiente de transmissão do elemento da envolvente opaca em W/m<sup>2</sup>, para os elementos da envolvente exterior do edifício em estudo, ou seja, paredes exteriores do edifício e cobertura do Piso 2. Os valores de U obtidos encontram-se representados na Tabela A

3 e Tabela A 4, respetivamente. O termo  $A_{op}$  representa a área do elemento da envolvente opaca exterior em  $m^2$ . O termo  $R_{se}$  representa a resistência térmica superficial exterior e toma o valor de  $0,04 m^2 \cdot ^\circ C/W$ , segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013.

A substituição da equação (4-22) na equação (4-20), permite obter a equação (4-23) que traduz o valor dos ganhos solares através da envolvente opaca na estação de arrefecimento. O fator de obstrução ( $F_{s,vnj}$ ) de superfícies opacas é totalmente opcional, não sendo considerado no cálculo, pelo que toma o valor de 1 de acordo com o Despacho N.º 15793-K/2013 de 3 de dezembro.

$$Q_{sol,v} = \sum_j \left[ I_{sol,j} \cdot \sum_n F_{s,vnj} \cdot \alpha \cdot U \cdot A_{op} \cdot R_{se} \right] \quad (4-23)$$

O cálculo da equação (4-23) é diferente no Piso 2 pois este é composto por dois tipos de envolvente exterior: paredes exteriores e cobertura do Piso. O seu cálculo encontra-se resumido na Tabela A 18 do Anexo 6. A Tabela A 17 do Anexo 6 resume o cálculo nos Pisos 0 e 1, onde a envolvente exterior é composta apenas por paredes exteriores.

De forma a completar a determinação das necessidades nominais anuais de energia útil para o arrefecimento,  $N_{vc}$ , segundo a equação (4-15) é necessário calcular o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento ( $\eta_v$ ). Uma vez obtidos todos os parâmetros necessários para a obtenção de  $\eta_v$  segundo a metodologia presente no Anexo 4, o seu cálculo encontra-se resumido na Tabela A 9 do referido Anexo, e tem o valor de 0,49. Sendo assim, o valor de  $N_{vc}$  obtido é de 18,44 kWh/m<sup>2</sup>.ano, tendo em conta o valor obtido de  $Q_{gu}$  na Tabela A 19 do Anexo 6, de 30,42 MWh.

### 4.3. Necessidades nominais anuais de energia térmica útil para a preparação de águas quentes sanitárias ( $Q_{AQS}$ )

De forma a obter a energia necessária para a preparação de água quente sanitária (AQS), é necessário em primeiro lugar saber qual o volume AQS, utilizada no edifício em estudo. Esse valor é obtido recorrendo ao Despacho (Extrato) n.º 15793-I/2013 de 3 de dezembro nos termos e para os efeitos do Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto, que estabelece as metodologias de cálculo para determinar as necessidades nominais de energia útil para a produção de AQS. Para os edifícios habitacionais, o consumo de AQS médio diário de referência em litros, é calculado de acordo com a equação (4-24),

$$M_{AQS} = 40 \cdot n \cdot f_{eh} \quad (4-24)$$

onde o termo “n” representa o número de ocupantes do espaço do edifício em estudo, ou seja, 78 alunos como referido anteriormente no subcapítulo 3.4.1. O termo  $f_{eh}$  equivale ao fator de eficiência hídrica, aplicável a chuveiros ou sistemas de duche com certificação e rotulagem de eficiência hídrica, de acordo com um sistema de certificação de eficiência hídrica da responsabilidade de uma entidade independente reconhecida pelo sector das instalações prediais. Para o caso é considerado  $f_{eh} = 1$ , de acordo com o Despacho utilizado.

Sendo assim, uma vez obtido o valor de 3120 litros de AQS média diária (40 L/aluno), é possível avaliar a necessidade de energia térmica útil necessária para a preparação das mesmas em MWh/ano, através da equação (4-25), de acordo com o Despacho (Extrato) n.º 15793-I/2013 de 3 de dezembro,

$$Q_{AQS} = \frac{M_{AQS} \cdot 4187 \cdot \Delta T \cdot n_d}{3600 \cdot 10^6} \quad (4-25)$$

onde:

- O termo  $\Delta T$  representa o aumento de temperatura necessário para a preparação de AQS, que para efeitos do presente cálculo toma o valor de referência 35 °C, segundo o presente Despacho. Ou seja, a água da rede que tem uma temperatura média ao longo do ano de 16,8 °C, segundo o *software* utilizado, *RETscreen*, depois de transformada em AQS a sua temperatura é de 52 °C.
- O termo  $n_d$ , representa o número de dias de consumo de AQS durante o ano, ou seja, 365 dias.

O valor obtido, através da equação (4-25), de energia térmica necessária para a preparação de AQS, é de 46,36 MWh/ano.

#### **4.4. Dimensionamento do sistema de Bomba de Calor Geotérmico (BCG)**

De forma a avaliar a correta aplicação da tecnologia de Bomba de Calor Geotérmico (BCG) no edifício em estudo, é importante saber qual a dimensão apropriada do sistema a instalar. Para tal, é necessário saber qual a capacidade, ou potência, da(s) bomba(s) de calor a instalar, assim como, a dimensão do permutador geotérmico associado que permite a utilização eficiente da(s) respetiva(s) bomba(s). O *software* *RETscreen* é a ferramenta utilizada para o dimensionamento dos principais componentes do sistema de BCG.

##### **4.4.1. Capacidade da bomba de calor**

A escolha da capacidade, ou potência, da bomba de calor a instalar é feita de forma a cobrir as necessidades de pico de carga no aquecimento e arrefecimento. Os picos de carga representam a potência máxima que o sistema necessita fornecer na refrigeração e aquecimento do dia mais quente e mais frio do ano, respetivamente. Tipicamente o dia mais quente e frio do ano ocorrem na estação de arrefecimento e aquecimento, respetivamente.

##### **4.4.1.1. Balanço de energia (RETscreen)**

O *software* *RETscreen* possibilita o cálculo dos picos de carga para as estações de arrefecimento e aquecimento. De modo a facilitar o utilizador o *RETscreen* fornece os parâmetros climáticos da região da Amadora, obtidos através da recolha de dados das estações em terra e de satélites da NASA (*RETscreen* 2015). Para além dos dados climáticos fornecidos são necessários definir alguns parâmetros para que o *software* efetue os cálculos desejados. A Tabela 15 demonstra os parâmetros necessários para utilização do *software* *RETscreen*.

Tabela 15 - Parâmetros necessário para utilização do software RETscreen

Fornecidos ( <i>RETscreen</i> )	Definidos (Utilizador)	Calculados ( <i>RETscreen</i> )
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dados do local</li> <li>- Temperatura do Ar</li> <li>- Graus-Dia de aquecimento e arrefecimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Área do edifício</li> <li>- Necessidades de energia útil para aquecimento e arrefecimento</li> <li>- Energia para preparação de AQS</li> <li>- Energia para arrefecimento, independente do clima</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade energética mensal [kWh]</li> <li>- Picos de carga [kW]</li> <li>- Carga para o edifício [W/m<sup>2</sup>]</li> </ul>

Observando a Tabela 15, um dos parâmetros mais importantes a definir pelo utilizador são as necessidades nominais anuais de energia útil, para aquecimento ( $N_{ic}$ ) e arrefecimento ( $N_{vc}$ ), estas foram obtidas anteriormente nos subcapítulos 4.1 e 4.2 respetivamente, os seus valores obtidos foram de 33,17 kWh/m<sup>2</sup> para  $N_{ic}$  e 18,44 kWh/m<sup>2</sup>.ano para  $N_{vc}$ . Tendo em conta a área total a climatizar no edifício de 839 m<sup>2</sup>, definida anteriormente no subcapítulo 3.4.1,  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$  tomam os valores de 27,84 MWh/ano e 15,48 MWh/ano, respetivamente. A energia térmica necessária para a preparação de AQS foi também definida anteriormente no subcapítulo 4.3, o valor obtido foi de 46,36 MWh/ano. Ao somar toda a energia térmica útil anual necessária para aquecimento de espaços e preparação de AQS, o valor obtido é de 74,19 MWh, 62,5% dessa energia é a utilizada na preparação de AQS.

Outro parâmetro a definir pelo utilizador é a percentagem da energia necessária para a refrigeração do edifício na estação de arrefecimento, que é utilizada para colmatar os ganhos térmicos independentes do clima, ou seja, a energia referente aos ganhos térmicos internos ( $Q_{int,v}$ ) que foi obtida anteriormente no subcapítulo 4.2.3.1. O valor de  $Q_{int,v}$  obtido foi de 9,83 MWh, este representa 32,3% dos ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento ( $Q_{g,v}$ ) como é possível constatar através da consulta da Tabela A 19 do Anexo 6.

Uma vez definido pelo utilizador todos os parâmetros necessários, o *RETscreen* permite calcular os picos de carga para as respetivas estações, estes encontram-se representados na Tabela 16 e para as estações de aquecimento e arrefecimento são 21,01kW e 6,37kW, respetivamente.

A escolha da capacidade, ou potencia térmica, da bomba de calor deste caso de estudo é feita de forma a cobrir 100% das necessidades de pico de carga nas respetivas estações, apesar de segundo Banks (2009) isso significar um risco se a utilização do aparelho for intermitente, resultando numa utilização excessiva do compressor da bomba. Outra opção seria uma bomba de calor dimensionada de modo a fornecer parte da necessidade de carga máxima calculada. Segundo Skarphagen (2006), esta foi em tempos uma prática comum nos países Escandinavos, escolher uma BCG dimensionada de forma a cobrir em média 60% dos picos de carga, fornecendo assim a maior parte das necessidades de energia do edifício.

Tabela 16 – Parâmetros de dimensionamento necessários definir para utilização do software *RETScreen*.

	<b>Aquecimento</b>	<b>Arrefecimento</b>
<b>Necessidades de energia útil para climatização</b>	27,84 MWh	15,48 MWh
<b>Necessidades de energia útil para preparação de AQS</b>	46,36 MWh	-
<b>Necessidades de energia útil Total</b>	74,19 MWh	
<b>Percentagem de energia útil para preparação de AQS</b>	62,5% (46,36 MWh)	-
<b>Percentagem de energia útil para arrefecimento, independente do clima</b>	-	32,3 %
<b>Picos de carga</b>	21,01 kW	6,37 kW

Após a obtenção dos Picos de carga para as diferentes estações, é possível corrigir através do software *RETScreen* a quantidade necessária de energia útil total ao longo do ano, uma vez que apenas foram calculadas, segundo a legislação em vigor, as necessidades para as respetivas estações.

Não existe necessidade de corrigir a quantidade de energia para o aquecimento, pois é possível verificar através da Tabela 2 do subcapítulo 3.2 que os Graus-dia de Aquecimento apenas existem para os meses considerados na estação de aquecimento (inverno). Sendo assim, a energia necessária para o aquecimento é de 46,36 MWh para preparação de AQS, 27,83 MWh para o aquecimento de espaços, perfazendo o total de 74,19 MWh/ano. O mesmo não pode ser considerado para a energia necessária para o arrefecimento pois observando a Tabela 2 do subcapítulo 3.2 é possível verificar a existência de Graus-dia de arrefecimento nos meses fora da estação de arrefecimento (verão).

Ao efetuar a correção do balanço energético ao longo do ano obtém-se uma necessidade de energia útil para o arrefecimento de 25,76 MWh/ano, observado na Tabela 17.

A Figura 21 demonstra o balanço de carga obtido através do *RETscreen*, com as necessidades de carga mensais de aquecimento e arrefecimento. Observa-se também que o valor de energia necessária para o aquecimento ao longo do ano é mais elevado que a energia para arrefecimento, o que indica que o sistema é dimensionado a partir da carga de ponta de aquecimento. É possível observar as cargas para a preparação e AQS de 4,5 kW nos meses de verão.

Tabela 17 – Balanço de carga do edifício e energia útil obtido.

Mês	Aquecimento [kW]	Arrefecimento [KW]
Janeiro	17,54	1,19
Fevereiro	13,99	1,45
Março	9,90	2,08
Abril	7,95	2,37
Maio	5,33	3,03
Junho	4,50	3,98
Julho	4,50	4,53
Agosto	4,50	4,65
Setembro	4,50	4,24
Outubro	4,50	3,26
Novembro	8,88	2,20
Dezembro	13,37	1,51
<b>Carga de Pico</b>	21,01	6,37
<b>Carga média para a estação</b>	12,74	4,35
<b>Energia útil</b>	74,19 MWh	25,76 MWh

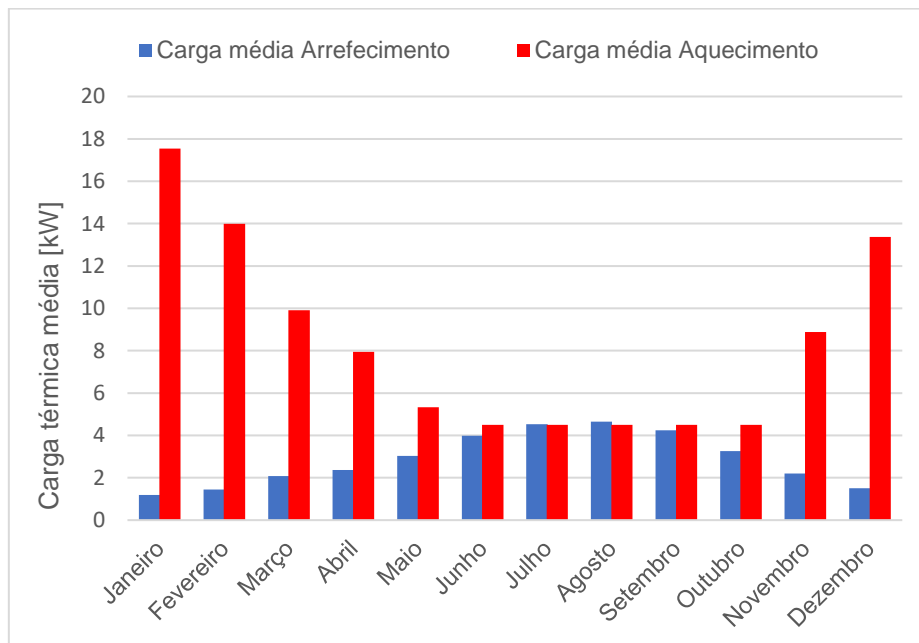


Figura 21 - Comportamento da carga térmica de aquecimento e arrefecimento, do caso de estudo.

Uma vez conhecidos os valores dos picos de carga térmica das estações de aquecimento e arrefecimento do edifício, foi necessário consultar alguns catálogos de diferentes marcas fabricantes de unidades, ou aparelho, de Bombas de Calor, com o objetivo de escolher uma unidade com a potência máxima adequada às necessidades de pico de carga. O software *RETScreen* possui na sua base de dados um vasto catálogo de unidades de BCG, no entanto, a procura da unidade de BCG mais adequada ao caso de estudo foi efetuada no mercado Ibérico através de CYPE Ingenieros, S.A. (2016). Na Tabela A 20 do Anexo 7 é possível observar dois exemplos de unidades de BCG água-água com a potência adequada ao caso de estudo de duas marcas de fabricantes comercializadas na Península Ibérica. As características de desempenho da unidade água-água bomba de calor reversível geotérmico, escolhida, para produção de AQS, aquecimento e refrigeração, podem ser observadas na tabela seguinte.

Tabela 18 – Características de fábrica do aparelho água-água de BCG da *Ecoforest*, comercializada na península Ibérica (CYPE Ingenieros, S.A., 2016), especificação detalhada no Anexo 8.

<b>Marca</b>	<b>Ecoforest</b>
<b>Modelo</b>	ecoGEO B4 5-22
<b>Alimentação</b>	Trifásica
<b>Potência Frigorífica Nominal [kW]</b>	29
<b>Potência Calorífica Nominal [kW]</b>	25
<b>EER</b>	5
<b>COP</b>	4,9

#### **4.4.2. Sistema de Permutador Geotérmico**

O software *RETScreen* permite efetuar a avaliação do sistema de permutador geotérmico a escolher. Para o edifício em estudo são escolhidos dois sistemas de permutador geotérmico a avaliar, o sistema de permutador geotérmico de circuito fechado vertical descrito na Figura 7 do subcapítulo 2.3.2 e o sistema de permutador geotérmico de água subterrânea de circuito aberto representado na Figura 8 2.3.3.

##### **4.4.2.1. Critério de dimensionamento**

O critério de dimensionamento do permutador geotérmico está relacionado com a forma de satisfazer a estação que requer a maior necessidade de energia. Uma vez que a quantidade de energia necessária para o aquecimento do edifício em estudo é muito maior do que a de arrefecimento, o permutador deve ser dimensionado para a estação de aquecimento.

O dimensionamento do permutador geotérmico para a estação de aquecimento permite o funcionamento eficiente do sistema na estação para qual está dimensionado, assim como, quando o funcionamento do sistema for revertido para o arrefecimento pois o permutador geotérmico estará sobredimensionado permitindo ao sistema trabalhar perto do EER de arrefecimento máximo. Se o dimensionamento for para a estação de arrefecimento o tamanho do permutador geotérmico não é suficiente para que o sistema seja eficiente na estação de maior necessidade de energia.

#### 4.4.2.2. Parâmetros a definir no dimensionamento do sistema geotérmico

Para a obtenção da dimensão do sistema geotérmico é necessário definir alguns parâmetros gerais a inserir no software RETScreen, sendo estes: as propriedades do solo (condutividade, difusividade, calor específico) as necessidades energéticas (cargas de pico e médias para a estação de aquecimento, assim como, o COP para qual o sistema é dimensionado). A Tabela 19 demonstra as características dos parâmetros mencionados.

Tabela 19 - Parâmetros necessários inserir para utilização do *software RETScreen*.

<b>Necessidades energéticas</b>	
Pico de carga na estação de aquecimento	21 kW
Carga média na estação de aquecimento	12,7 kW
COP para aquecimento	4,9
<b>Propriedades do solo</b>	
Temperatura	18,5 °C
Condutividade	2,4 W/(m.°C)
Difusividade	1,03 x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
Calor específico	0,84 kJ/(kg.°C)

Dos parâmetros representados na tabela anterior as necessidades energéticas foram obtidas de acordo com o balanço de energia efetuado anteriormente para o edifício. As propriedades do solo que o *software* utiliza foram escolhidas de modo a que se aproximem dos valores dos diferentes tipos de rocha presentes na região da Amadora, estes podem ser consultados na Tabela 3 do subcapítulo 3.3.

Os parâmetros gerais apresentados anteriormente na Tabela 19 não são suficientes para calcular o dimensionamento dos diferentes tipos de sistema geotérmico escolhidos. É necessário definir outros parâmetros específicos para cada tipo de sistema a avaliar. Para um sistema de permutador geotérmico de circuito fechado vertical é necessário definir distanciamento mínimo entre cada furo no caso de ser necessário utilizar mais do que um. No caso de um sistema de permutador geotérmico de água subterrânea de circuito aberto é necessário definir a profundidade típica do poço de fornecimento de



água do local em estudo, o caudal máximo que pode ser fornecido continuamente pelo poço e a profundidade a que a bomba se encontra instalada no poço. A Tabela 20 demonstra as características dos parâmetros específicos para os dois tipos de sistema de permutador geotérmico mencionado.

Tabela 20 – Características dos parâmetros específicos para os dois tipos de sistema de permutador geotérmico considerados para o caso de estudo.

<b>Sistema de circuito fechado vertical</b>	
Separação mínima entre furos verticais	6,1 m
<b>Sistema de água subterrânea de circuito aberto</b>	
Profundidade típica do poço da Academia	≈10 m
Profundidade da bomba	9 m
Caudal máximo considerado para o poço	1,5 l/s

Dos parâmetros representados na tabela anterior a separação mínima entre furos verticais de 6,1 m escolhida para um sistema de circuito fechado vertical, representa a distância que o modelo do *software RETscreen* considera normal, a escolha de uma distância mais curta reduz a área de terreno necessário, no entanto, não só a dimensão do permutador geotérmico necessário será maior como a longo prazo as cargas de aquecimento são maiores do que as de arrefecimento ou vice-versa, reduzindo assim a eficiência do sistema geotérmico (RETScreen, 2015). As considerações efetuadas para os parâmetros específicos para um sistema de água subterrânea de circuito aberto foram efetuadas de acordo com as características hidrogeológicas apresentadas anteriormente no subcapítulo 3.3.1.

#### **4.4.2.3. Cálculos do Dimensionamento do sistema geotérmico**

Após inserir todas as variáveis necessárias no software RETScreen, o resultado do cálculo dos principais parâmetros de dimensionamento dos dois tipos de sistema de permutador geotérmico a avaliar pode ser observado na Tabela 21.

Para o sistema de permutador geotérmico de circuito fechado vertical os parâmetros obtidos foram calculados tendo em conta que o modelo *RETscreen* considera uma tubagem de polietileno em “U” de alta densidade com 32 mm de diâmetro nominal, com argamassa de betonite. A obtenção da área de terreno necessária é feita considerando que a profundidade típica de furação é de 91 m, de acordo com o modelo *RETscreen*, sendo o valor do comprimento do furo um valor cumulativo calculado pelo modelo. O comprimento do “loop” do sistema geotérmico necessário para cobrir o pico de carga de aquecimento, representa o comprimento aproximado de toda a tubagem que será instalada debaixo do solo onde a solução do “loop” é 100% água.

Tabela 21 – Principais parâmetros de dimensionamento obtidos no software RETScreen para os dois sistemas considerados.

<b>Sistema de circuito fechado vertical</b>	
Área de terreno necessária	146 m <sup>2</sup>
Comprimento do furo	579 m
Total do “Loop” do sistema geotérmico	1157 m
<b>Sistema de água subterrânea de circuito aberto</b>	
Número de poços de abastecimento	1
Caudal de água subterrâneo necessário	1 l/s
Potência da bomba do poço	0,5 kW
Permutador de calor central	23,7 kW

Para o sistema de permutador geotérmico de água subterrânea de circuito aberto, o modelo *RETScreen* calculou o número de poços de abastecimento baseado no caudal máximo considerado para o poço apresentado anteriormente na Tabela 20. O caudal de água subterrâneo necessário calculado através do modelo depende da temperatura da água subterrânea e a eficiência do permutador de calor central onde se assume neste uma temperatura de aproximação, ou seja, uma diferença entre o circuito geotérmico e o circuito do edifício de 2,8 °C. A potência da bomba do poço é obtida de acordo com a profundidade considerada onde esta se localiza.

## 5. Balanço Financeiro, resultados

### 5.1. Energia. Poupança anual

Por forma a efetuar a análise económica, é necessário proceder primeiro a uma comparação entre o sistema a instalar, com o sistema existente de climatização para o edifício em estudo na Academia Militar – Aquartelamento da Amadora. Deste modo é possível perceber qual a vantagem económica do caso de estudo. O cálculo do custo anual da energia final utilizada, em €, para cada sistema pode ser efetuado através da equação (5-1),

$$\text{Custo anual da energia}_i = \frac{\text{Energia total}_i}{COP_j} \times \text{Preço energia} \quad (5-1)$$

onde o índice  $i$  representa tanto o aquecimento ou arrefecimento, e o índice  $j$  representa as diferentes tecnologias.

O sistema existente para aquecimento do espaço e preparação de águas quentes sanitárias (AQS), no edifício do Aquartelamento da Amadora, é uma caldeira a gás natural. O rendimento considerado para a caldeira está de acordo com Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013 nos termos e para os efeitos do Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto, que procede à publicação das regras de simplificação a utilizar nos edifícios sujeitos a grandes intervenções, bem como já existentes, previstos nos artigos 28º e 30º do referido decreto-lei, nas situações em que se verifique impossibilidade ou limitação no acesso a melhor informação. Para o caso de estudo o rendimento da caldeira considerado é de 68%, visto esta ter mais de 10 anos. O preço do gás natural para a região da Amadora (Lisboagás) é de 0,0588 €/kWh mais 56,88 €/ano referente ao termo tarifário fixo (ERSE, 2016).

Para a refrigeração ambiente do espaço, é feita a comparação com um sistema de ar condicionado, com um EER convencional de 3,5 segundo Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013. O Preços da eletricidade em média tensão são de 0,13€/kWh em Portugal, segundo a (ERSE, 2016).

Para obter o cálculo do custo de energia anual do sistema de BCG não são utilizados os COP/EER máximos do aparelho 4,9 e 5 para o funcionamento no modo de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. O COP/EER considerado é de 4. Este valor representa uma eficiência anual que tem em conta o efeito do funcionamento intermitente da unidade de Bomba de Calor Geotérmico (RETScreen, 2015). A Tabela 22 demonstra quais os custos anuais de energia calculados através da equação (5-1), para as diferentes tecnologias consideradas. A quantidade de energia obtida anteriormente na Tabela 17 no subcapítulo 4.4.1.1 é de 74,19 MWh e 25,76 MWh para aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

Tabela 22 – Custo da energia, em €, para as diferentes tecnologias consideradas no caso de estudo.

Tecnologia	COP/EER		Aquecimento	Arrefecimento	Total anual
	Aquecimento	Arrefecimento	Custo energia [€]	Custo energia [€]	Custo energia [€]
BCG	4	4	2192,08	760,99	2953,07
Caldeira	0,68	-	6472,42	-	6472,42
Ar condicionado	-	3,5	-	956,67	956,67

A poupança anual é de 4476 €, que equivale ao somatório dos custos de energia da caldeira e ar condicionado, menos os custos de energia da BCG.

## 5.2. Parâmetros Financeiros

Uma vez obtidas as poupanças anuais de energia, de modo a finalizar a análise financeira, é necessário calcular alguns parâmetros essenciais na avaliação de um projeto. Estes são:

- Valor atual líquido (VAL) é o valor que compara a quantidade de capital investida no projeto com os valores futuros de *cash flows*, depois de serem descontados pela taxa de juro. Projetos de investimento com VAL negativo, são inaceitáveis por serem inviáveis. A equação demonstra como calcular o VAL do projeto em questão (Oliveira, 2014; Soares, 2007),

$$VAL = \sum_{k=0}^k \frac{CF_k}{(1+r)^k} \quad (5-2)$$

onde,  $CF_k$  representa o *cash flow* durante o período k, e “r” representa a taxa de juro da dívida.

- A taxa interna de retorno (TIR) é outro parâmetro importante na avaliação de um projeto. Esta taxa é a que torna o VAL igual a zero. Geralmente quanto maior o valor do TIR, mais desejável é o projeto (Oliveira, 2014).
- O período de retorno (PR) representa o número de períodos, ou anos, que é necessário para que o *cash flow* acumulado seja igual ao investimento inicial (Oliveira, 2014).

Para a obtenção dos parâmetros referidos nos pontos anteriores, é necessário saber quais os custos de investimento assim como outros parâmetros. Na Tabela 23 encontram-se representados todos os parâmetros considerados para a análise financeira.

Tabela 23 - Parâmetro económicos comuns, considerados para o caso de estudo.

<b>Parâmetros</b>		
Tempo de vida do projeto	15 anos	
Taxa juro da dívida <sup>a</sup>	3,6 %	
Poupança anual	4.476 €	
Custo da unidade de BCG <sup>b</sup>	12.942 €	
Custos de Manutenção decenal (Unidade de BCG) <sup>b</sup>	8.918 €	
<b>Tipo de BCG</b>	<b>BCAS Vertical</b>	<b>BCASub</b>
Custo do sistema geotérmico <sup>b</sup>	12.233 €	3.658 €
Custos de Manutenção anual sistema geotérmico <sup>b</sup>	157 €	64 €
VAL	24.117 €	32.450 €
TIR	18%	34%
Período de Retorno	≈ 5 anos	≈ 3 anos

<sup>a</sup> (Trading Economics, 2016)

<sup>b</sup> (CYPE Ingenieros,S.A., 2016)

Os custos apresentados na Tabela 23, referentes à unidade de BCG e respetivos custos de manutenção podem ser consultados na Tabela A 21 do Anexo 8, os custos de instalação do sistema geotérmico vertical e de água subterrânea são apresentados, respetivamente no Anexo 9 e Anexo 10. Os custos de instalação variam consoante a zona geográfica do país para o qual se vai executar o projeto e os preços de mercado correspondentes. Para o caso de estudo os preços foram obtidos através de uma base de dados paramétrica e interativa, esta contempla custos que podem não ser previstos representando 10% do total (CYPE Ingenieros,S.A., 2016).

Tomando o exemplo do sistema de Bomba de Calor Geotérmico vertical (BCAS Vertical), pois é o mais estudado, é possível efetuar o rácio entre o custo de investimento total (25175 €) e a potência de pico para qual o sistema está dimensionado (21kW), e o valor obtido é de 1199 €/kW. O valor do rácio obtido encontra-se dentro do intervalo de 1100 – 2130 € para a zona Europeia, de acordo com da Agência Internacional de Energias Renováveis (International Renewable Energy Agency, 2013)

Para a obtenção dos parâmetros financeiros, foi assumido um financiamento de 100% do capital necessário para o investimento, com uma taxa de juro de 3,6%. A análise foi efetuada para 15 anos,

pois tipicamente é o tempo de vida de uma unidade de bomba de calor. No entanto, no ano 10 foi considerado o custo decenal do aparelho de bomba de calor de modo a substituí-lo.

Uma vez tendo todos os parâmetros necessários, o VAL obtido para o caso de estudo tem o valor de 24117 € e 32450 € para o sistema geotérmico vertical e de água subterrânea, respetivamente. O valor do VAL é positivo, o valor da TIR é relativamente alto comparando com as taxas de juro dos últimos anos (Trading Economics, 2016).

### 5.3. Discussão dos Resultados Obtidos

#### 5.3.1. Viabilidade económica

Através da Tabela 22 é possível observar os custos de energia nos sistemas de climatização considerados para o edifício em estudo e com a instalação do sistema geotérmico de bomba de calor baseado nos preços da energia para o ano de 2016. Consequentemente obtém-se a poupança anual de energia utilizada na climatização com a instalação do sistema de BCG (4476 €), este valor é um dos parâmetros chave para chegar aos resultados observados na Tabela 23.

A Figura 22 demonstra a evolução dos *cash flows* acumulados ao longo do ciclo de vida do projeto, onde são consideradas não só a poupança de energia como todos os custos associados apresentados anteriormente na Tabela 22. É possível observar o investimento inicial para os dois sistemas considerados, o *cash flow* vai melhorando tendo uma ligeira queda no 10º ano, onde é efetuada a substituição do aparelho da Bomba de Calor.

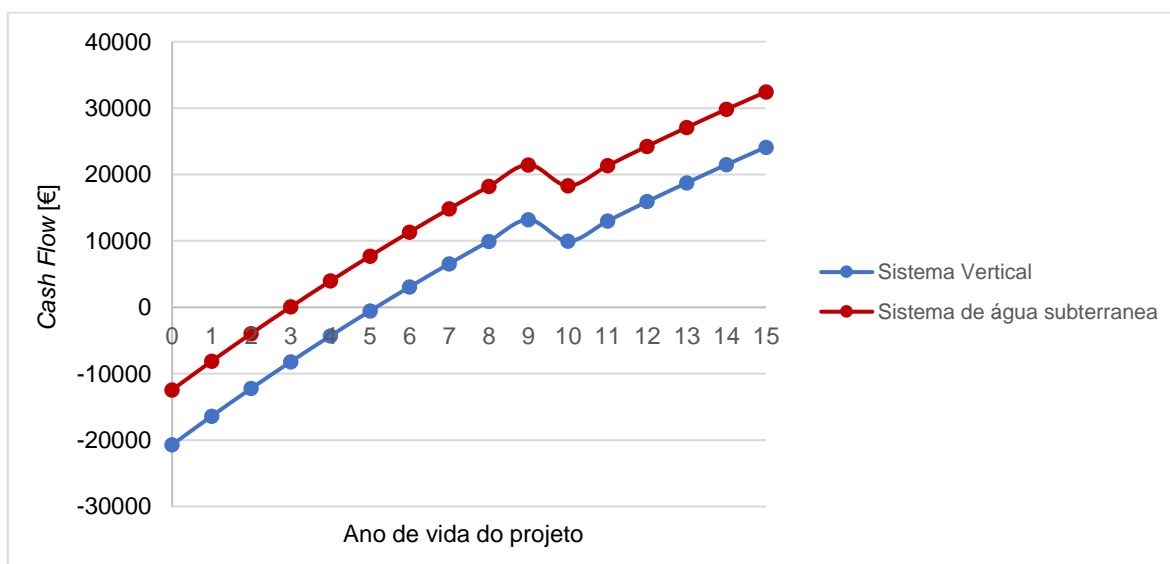


Figura 22 – Evolução do *Cash Flow* acumulado [€] ao longo do período de projecto [15 anos].

Através da figura Figura 22 facilmente se observa que os dois tipos de sistema geotérmico considerados no caso de estudo são economicamente interessantes. Os custos de investimento são

reembolsados em 3 anos para o sistema de água subterrânea e 5 anos para o sistema vertical. Os ganhos após os 15 anos de operação são de 32.450 € e 24.117€, respetivamente para o sistema de água subterrânea e sistema vertical. Este resultado confirma a eficiência energética da bomba de calor e permite obter uma margem de erro considerável no caso de incerteza.

### 5.3.2. Critérios de decisão financeira

O investimento em qualquer projeto envolve sempre a incerteza, e conseqüentemente risco. É difícil prever de uma forma precisa os parâmetros financeiros que influenciam diretamente o *cash flow* de um projeto ao longo do tempo de vida e a sua rentabilidade. No entanto, é utilizada a taxa de desconto da dívida para efetuar uma análise da flutuação financeira.

A taxa de desconto de 3,6% que foi utilizada anteriormente para obter o valor atual em euros dos *cash flows* futuros, através da equação (5-2), está associada à vulnerabilidade do investimento pois quando maior for maior o risco. A taxa de desconto da dívida pode ser considerada como a taxa mínima de atratividade, deve ser sempre inferior ao valor da TIR para que o investimento seja viável. Tipicamente são utilizadas taxas de desconto entre 3 a 18 para investimentos relacionados com consumos elétricos (RETSscreen, 2015). A Figura 23 apresenta a evolução do VAL ao variar a taxa de, para os dois tipos de sistema geotérmico considerados. É possível verificar que para uma taxa juro inferior ao valor da TIR o investimento é válido pois o VAL é positivo

- Os picos de carga dependem não só das características do edifício como do clima da região. Estes foram importantes para obter a potencia da unidade de BCG a instalar.

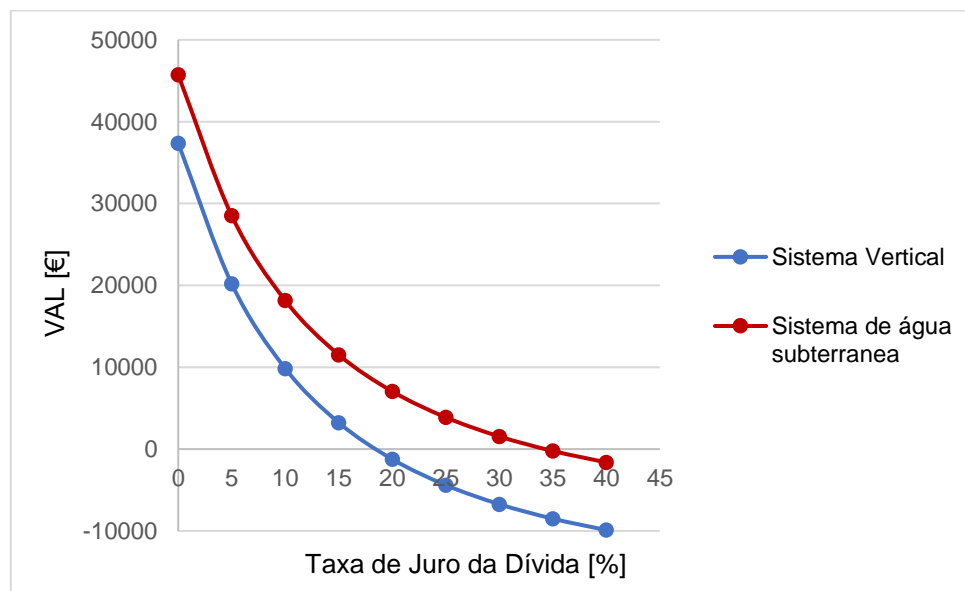


Figura 23 – Evolução do VAL para os sistemas geotérmico vertical e de água subterrânea em função da Taxa.

Outro critério a ter em conta na decisão Financeira está relacionado com o número de alunos que habita o edifício em estudo, pois o dimensionamento foi efetuado para a capacidade máxima do edifício (78 alunos) e tem influência no VAL do projeto. É possível estimar o número de alunos necessários para que a implementação dos sistemas geotérmicos considerados seja indiferente financeiramente, ou seja, o valor do VAL seja nulo. A estimativa é feita através da função *Solver* do *software Excel* e a sua metodologia encontra-se descrita no Anexo 11, o número de alunos obtido para o sistema geotérmico vertical é de 44 alunos e para o sistema geotérmico de água subterrânea é de 32 alunos.

Mesmo quando o retorno financeiro é mínimo os benefícios ambientais podem tornar o projeto desejável.

### **5.3.3. Impacto ambiental**

O *software RETScreen* permite determinar o impacto na redução de emissões de gases de efeito de estufa em toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (tCO<sub>2</sub> eq.), com a implementação da nova tecnologia a instalar. Para o caso de estudo foi considerado o *mix* de energia utilizado na região para produção de eletricidade, sendo assim, tendo em conta a eficiência anual da bomba de calor considerada anteriormente (COP=4) o *software* indica uma redução de emissões anuais em 14,1 tCO<sub>2</sub>eq.

### **5.3.4. Comparação com outros estudos**

É impossível efetuar uma comparação direta entre os resultados obtidos no caso de estudo devido às diferentes técnicas e considerações efetuadas em cada estudo. Por exemplo um dos estudos mais antigos efetuado no Canada onde foi feita uma análise tecno económica de um sistema de BCG, concluiu-se que era um investimento financeiramente eficiente comparado com um sistema de aquecimento a óleo existente, tendo em conta que o preço do sistema completo para a altura foi de aproximadamente 10.000 €, o preço da eletricidade foi de aproximadamente 0,10 €/kW e do óleo de aproximadamente 0,40 €/litro (Healy & Ugursal, 1997). Também (Self et al., 2013) avaliaram no Canada que a utilização de BCG é financeiramente viável, no entanto, não explicaram a base de cálculo e o preço assumido para o sistema de BCG é de aproximadamente 10.000 € comparando com os 25.175 € do sistema geotérmico de BCAS deste estudo, o que impossibilita a conclusão entre resultados.

Badescu (2007) efetuou um estudo à utilização de BCG para o aquecimento e arrefecimento, na Alemanha, e concluiu que para um período de operação de 3 a 10 anos o sistema de BCAS horizontal era a solução mais eficiente financeiramente, comparando com o aquecimento a gás e óleo. O sistema, no entanto, era muito menor comparando como este caso de estudo (4kW, 2684€) devido ao clima da região e ao melhor isolamento do edifício. Para a mesma região da Alemanha, mas para um sistema vertical Blum et al., (2011) estimaram um custo de 2200 €/kW.

A análise efetuada em estudos anteriores demonstra que as bombas de calor com elevada eficiência na maioria dos casos, demonstra uma poupança muito positiva no consumo de energia e em emissões



de gases de efeito e estufa. Os resultados podem variar substancialmente dependendo dos fatores chave considerados, nomeadamente a eficiência da bomba de calor, os fatores de emissão de CO<sub>2</sub>, o *mix* de produção de energia térmica e elétrica da região e por fima a carga térmica que será substituída pelo sistema de bomba de calor. Os resultados deste caso de estudo demonstram uma redução nas emissões de carbono e no consumo de energia. Por forma a incentivar o investimento nas tecnologias de bombas de calor geotérmicas de elevada eficiência, o apoio financeiro e incentivos fiscais são utilizados em alguns países e devem ser expandidos pois possibilitam um crescimento rápido na implementação desta tecnologia, particularmente na modernização de sistemas térmicos em edifícios antigos.

## 6. Conclusões

Com esta dissertação foi possível avaliar a implementação da tecnologia de Bomba de Calor Geotérmico (BCG) como um melhoramento da eficiência energética do edifício dormitório do Aquartelamento Militar da Amadora. Foram obtidas as cargas térmicas de acordo com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), que estabelece os requisitos para os edifícios de habitação sujeitos a intervenções e utilizado o *software RETScen* para efetuar o dimensionamento do sistema considerado. Este capítulo apresenta o processo e as principais conclusões obtidas ao longo deste assim como algumas sugestões para futuros trabalhos.

Para solucionar o caso de estudo de uma forma correta, diminuindo a incerteza, foram utilizadas metodologias descritas na regulamentação em vigor, REH, para a obtenção das cargas térmicas do edifício. As considerações foram efetuadas de acordo com as características físicas do edifício, como por exemplo os materiais que compõem a envolvente do edifício, assim como, as características climáticas e geográficas da região obtidas através de documentação adequada. A análise detalhada do cálculo da carga térmica permitiu diminuir a incerteza ao efetuar o dimensionamento conceptual e a respetiva viabilidade económica da aplicação do sistema de BCG.

Os sistemas de BCG contribuem para uma melhoria na eficiência energética, e este estudo pretendeu demonstrar a viabilidade da sua aplicação em Portugal. Para efetuar o estudo da viabilidade económica foi necessário perceber:

- **A energia térmica utilizada no edifício**, por forma, a chegar aos picos de carga necessários para o dimensionamento do sistema 21,01 kW e 6,37 kW para a estação de aquecimento (inverno) e arrefecimento (verão), respetivamente. Os picos de carga dependeram não só das características do edifício, mas do clima da região. Estes foram essenciais para obter a Potência da unidade de BCG necessária instalar.
- **As condições geográficas do local**, por forma, a entender o tipo de tecnologia a aplicar. Para o caso de estudo foram avaliados dois tipos de BCG, o sistema geotérmico acoplado ao solo vertical (BCAS Vertical) pois é o mais estudado em Portugal, e o sistema de água subterrânea (BCASub) ou de circuito aberto uma vez que o terreno apresenta dois poços de água perto do edifício. O tipo de material de que o solo é composto foi de extrema importância pois quanto maior a condutividade térmica do material mais facilmente o calor é transferido do/para o fluido que circula no circuito geotérmico, quanto maior a condutividade maior eficiência do sistema.
- **O dimensionamento do sistema**, foi importante para averiguar a área necessária na instalação do sistema BCAS Vertical (142 m<sup>2</sup>), para obter a Potência do permutador central no sistema de BCASub (23,7 kW) e obter os custos relacionados com a substituição do sistema existente no edifício pelo sistema geotérmico.

Ao efetuar o Balanço Financeiro aos dois sistemas geotérmicos considerados para o caso de estudo conclui-se que, os dois sistemas são economicamente viáveis, uma vez que os custos de investimento são reembolsados em 3 anos para o sistema de água subterrânea e 5 anos para o sistema vertical. Os ganhos após os 15 anos de operação são de 32.450 € e 24.117€, respetivamente para o sistema de

água subterrânea e sistema vertical. Este resultado confirma a eficiência energética da bomba de calor e permite obter uma margem de erro considerável no caso de incerteza como é possível observar na Figura 23.

Apesar do sistema considerado de BCASub ser o mais interessante do ponto de vista financeiro, é necessário considerar o facto de este sistema só pode ser utilizado, se as águas subterrâneas forem relativamente adequadas em termos de qualidade e as regulamentações ambientais locais permitam a sua utilização. Existem vários estudos para as BCASub onde foram descritas algumas reações químicas heterogéneas como o principal fator para potenciais problemas ambientais. Estas incluem o entupimento, corrosão, abrasão, química e biológica da bomba hidráulica submersa, assim como nos permutadores de calor. A alteração da qualidade de água, devido ao armazenamento térmico desta no aquífero foi estudada em laboratório e em campo, demonstrou alguns problemas ambientais como a erosão do subsolo e estruturas, assim como impactos térmicos neste (Garrido Schneider et al., 2016).

Sendo assim, conclui-se ser mais indicado o sistema de BCAS vertical pois, são as mais estudadas em Portugal, requerem uma área relativamente pequena de terreno, são também bastante eficientes em termos de performance (Soni et al., 2015).

Por Fim, os resultados deste caso de estudo confirmam uma redução nas emissões de carbono (14,1 tCO<sub>2</sub>eq) e no consumo de energia final.

## 7. Bibliografia

- Academia Militar (2016). Academia Militar. Disponível em: <http://www.academiamilitar.pt/resenha-historica.html> [Acedido em 8 Janeiro 2016].
- AI Energia, (2017). AI Energia.com. Disponível em: <http://ainenergia.com/energia-geotermica-en-islandia/> [Acedido em Janeiro 2017].
- Banks, D. (2009). An introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. 1ª ed. Wiley-Blackwell.
- Blum, P.; Campillo G. & Kolbel T. (2011). Techno-economic and spatial analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. Energy, Volume 36.
- Brandl, H. (2006). Géotechnique 56. Energy foundations and other thermo-active ground structures, Volume 2, pp. 81-122.
- Cabeças, R.; Carvalho, J. M. & Nunes, J. C. (2010). Portugal Country Geothermal Update 2010. Proceedings World Geothermal Congress 2010.
- Câmara Municipal da Amadora, Serviço Municipal de Proteção Civil, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, TERCUD - Centro de Estudos do Território, Cultura e Desenvolvimento (2013). Histórico de Ocorrências no Município da Amadora, 2000-2010. Normais Climatológicas da Amadora, 1915-2012. Amadora: Câmara Municipal da Amadora, Serviço Municipal de Proteção Civil.
- Carvalho, A. D.; Moura, P.; Vaz, G. C. & de Almeida, A. T. (2015). Ground source heat pumps as high efficient solutions for building space conditioning and for integration in smart grids. Energy Conversion and Management, 103, 991–1007.
- Carvalho, J. M.; Manuel, J.; Carlos, S.; Bicudo, A. & Cabeças, R. M. (2005). Portugal Geothermal Country Update 2005. Antalya, Turkey, World Geothermal Congress 2005.
- Carvalho, L. A. N. (2003). Potential of Borehole Systems in Portugal. PhD thesis. Lulea Tekniska Universitet.
- Coelho, L.; Cerdeira, R.; Garcia, J. A.; Sanner, B.; Abry, M. & Karytsas, C. (2010). Development and Demonstration of Ground Coupled Heat Pumps of High Technology. Setubal, In Proceedings World Geothermal Congress.
- Coelho, L.; Garcia, J.; Almeida, A.; Tavares, N.; Tavares, N.; Cerdeira, R.; Karytsas, K. & Auzenet, D. M. (2011). Ground Source Heat Pump on Building Acclimatization, Coimbra, Portugal
- Colaço, A. M. (2015). Assessing the Efficiency of Borehole Heat Exchanger Systems for Acclimatization. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

- Connolly, D.; Lund, H.; Mathiesen, B. V. & Leahy, M. (2010). A review of computer tools for analyzing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 87(4), 1059–1082.
- Costa, A. & Amaral, H. (2011). A água subterrânea como fonte térmica na climatização de edifícios (situação em Portugal e perspectivas futuras). Universidade de Aveiro, 1ª Conferência de Planeamento Regional e Urbano & 11º APDR.
- Crucho, E. A. L. & Costa, D. (2013). Caracterização Física do Concelho da Amadora e suscetibilidade às inundações. Universidade de Lisboa - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território.
- Cruz, R. J. L. V. (2013). Utilização da Energia Térmica do Solo para Climatização de Edifícios, Phd thesis. Universidade de Aveiro.
- CYPE Ingenieros, S.A., 2016. Gerador de Preços.info. Disponível em: [http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/calculaprecio.asp?Valor=1|0\\_0\\_0\\_0\\_0|1|ICV212|icv\\_212:\\_0\\_0\\_2\\_0\\_1\\_1c10\\_0\\_113\\_120c13\\_0](http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/calculaprecio.asp?Valor=1|0_0_0_0_0|1|ICV212|icv_212:_0_0_2_0_1_1c10_0_113_120c13_0) [Acedido em 30 09 2016].
- CYPE Ingenieros,S.A. (2016). Gerador de Preços Portugal. Disponível em: [http://www.geradordeprecos.info/obra\\_nova/Instalacoes/Aquecimento\\_\\_climatizacao\\_e\\_A\\_Q\\_S\\_/Captacao\\_solar/ICB010\\_Collector\\_solar\\_termico\\_para\\_instala.html](http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Instalacoes/Aquecimento__climatizacao_e_A_Q_S_/Captacao_solar/ICB010_Collector_solar_termico_para_instala.html) [Acedido em 20 5 2016].
- Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013, 3 de Dezembro (2013). Diário da República, 2.ª série N.º 234. Disponível em: <https://dre.pt/application/dir/pdf2sdip/2013/12/234000003/0001400025.pdf> [Acedido em 6 Janeiro 2016].
- Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, 3 de Dezembro (2013). Diário da República, 2.ª série N.º 234. Disponível em: <https://dre.pt/application/dir/pdf2sdip/2013/12/234000003/0002600031.pdf> [Acedido em 7 Janeiro 2016].
- Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013, 3 de Dezembro (2013). Diário da República, 2.ª série, N.º 234. Disponível em: <https://dre.pt/application/dir/pdf2sdip/2013/12/234000003/0004100054.pdf> [Acedido em 6 Janeiro 2016].
- Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, 3 de Dezembro (2013). Diário da República, 2.ª série N.º 234. Disponível em: <https://dre.pt/application/dir/pdf2sdip/2013/12/234000003/0005800087.pdf> [Acedido em 6 Janeiro 2016].
- Diao, N.; Li, Q. & Fang, Z. (2007). Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(no 12), pp. 1203-1211.
- EN ISO 13790:2008 (2016). ISO.org. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13790:ed-2:v1:en> [Acedido em 4 Janeiro 2016].
- Esen, H. & Inalli M. (2009). In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazlg, Turquia. *Energy and Buildings*, 41(no. 4), pp. 395-401.

- Eslami-Nejad, P.; Ouzzane, M. & Aidoun, Z. (2015). A quasi-transient model of a transcritical carbon dioxide direct-expansion ground source heat pump for space and water heating. *Applied Thermal Engineering*, 91, 259–269.
- Fabrizio, E.; Corrado, V. & Filippi, M. (2010). A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage. *Renewable Energy*, 35(3), 644–655.
- Fernandes, M.M. (2006). *Mecânica dos Solos Conceitos e Princípios Fundamentais*. Vol. 1. FEUP Edições. 4ª edição
- Florides, G. & Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers - a review of systems, models and applications. *Renewable Energy*, 32(no15), pp. 2461-2478.
- Garrido Schneider, E. A.; García-Gil, A.; Vázquez-Suñè, E. & Sánchez-Navarro, J. (2016). Geochemical impacts of groundwater heat pump systems in an urban alluvial aquifer with evaporitic bedrock. *Science of the Total Environment*, 544, 354–368.
- Guo, Y.; Zhang, G.; Zhou, J.; Wu, J. & Shen, W. (2012). A techno-economic comparison of a direct expansion ground-source and a secondary loop ground-coupled heat pump system for cooling in a residential building. *Applied Thermal Engineering*, 35(1), 29–39.
- Hakkaki-Fard, A.; Eslami-Nejad, P.; Aidoun, Z. & Ouzzane, M. (2014). A techno-economic comparison of a direct expansion ground-source and an air-source heat pump system in Canadian cold climates. *Energy*, 87, 49–59.
- INAG (2000). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Instituto da Água e Centro de Geologia.
- Instituto de Meteorologia e Agência Estatal de Meteorologia (2011). *Atlas Climático Ibérico*. Instituto de Meteorologia de Portugal.
- ISO 6946:2007, (2016). ISO.org. Disponível em: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=40968](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=40968) [Acedido em 8 Janeiro 2016].
- Kavanaugh, S. & Rafferty, K. (2014). *Geothermal Heating and Cooling - Design of Ground-Source Heat Pump Systems*. Atlanta: ASHRAE.
- Koroneos, C.; Xydis, G., & Polyzakis, A. (2010). The optimal use of renewable energy sources — The case of the new international “ Makedonia ” airport of Thessaloniki , Grécia, 14, 1622–1628.
- Lee, K.; Lee, D.; Baek, N.; Kwon, H. & Lee, C. (2012). Preliminary determination of optimal size for renewable energy resources in buildings using RETScreen. *Energy*, 47(1), 83–96.
- Moel, M.; Bach, P. M.; Bouazza, A.; Singh, R. M. & Sun, J. O. (2010). Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, pp. 2683-2696.
- Miranda, P.; Santos F. (2006). *O clima em Portugal nos Séculos XX e XXI*. Em: *Alterações climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação*. Lisboa. F. Santos & P. Miranda (Edits.).

- Moran, M. J. & Shapiro, H. N. (2010). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Oliveira, J. & C. M. (2014). *Engenharia Económica*. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/disciplinas/EEco75/2014-2015/1-semester/slides> [Acedido em 5 5 2016].
- Pais, J.; Moniz, C.; Cabral, J.; Cardoso, J.; Legoinha, P.; Machado, S.; Morais, M. A.; Lourenço, C.; Ribeiro, M. L.; Henriques, P. & Falé, P. (2006). *Notícia Explicativa da Carta geológica 1:50000, nº 34-D*. Lisboa: Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.
- Park, B.; Bae, G. & Lee, K. (2015). Importance of thermal dispersivity in designing groundwater heat pump (GWHP) system: Field and numerical study. *Renewable Energy*, 83, 270–279.
- Peel, M. C.; Finlayson, B. L. & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, 1633–1644.
- Petersen, S. & Svendsen, S. (2012). Method for component-based economical optimisation for use in design of new low-energy buildings. *Renewable Energy*, 38(1), 173–180.
- Healy P. F.; Ugursal V. I. (1997). Performance and economic feasibility of ground source heat pumps in cold climate. *Int. J. Energy Res.*
- PGRH – RH5 (2012) *Plano de Gestão da Bacia Hidrográfica do Tejo, 2012*. [www.apambiente.pt](http://www.apambiente.pt). [Acedido em 02 10 2016].
- Pina dos Santos, C. A. & Matias, L. M. C. (2006). *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios - ITE 50*. 1ª ed. Lisboa: LNEC.
- Pina dos Santos, C. A. & Rodrigues, R. (2009). *Coeficientes de transmissão térmica de elementos opacos da envolvente dos edifícios- Soluções construtivas de edifícios antigos - ITE 54*. 1ª ed. Lisboa: LNEC.
- Portal Energia (2016). *Portal Energia Energias Renováveis*. Disponível em: <http://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-geotermica/> [Acedido em 10 1 2016].
- Portaria n.º 349-B/2013, 29 de Novembro (2013). *Diário da República*, 1.ª série N.º 232. Disponível em: <https://dre.pt/application/dir/pdf1sdip/2013/11/23201/0001800029.pdf> [Acedido em 7 Janeiro 2016].
- Preene, M. & Powrie, W. (2009). Ground energy systems: from analysis to geotechnical design. *Géotechnique* 59, Volume 3, pp. 261-271.
- Privitera, G.; Day, A. R.; Dhesi, G. & Long, D. (2011). Optimising the installation costs of renewable energy technologies in buildings: A Linear Programming approach. *Energy and Buildings*, 43(4), 838–843.
- Ramalho, M.; Pais, J.; Rey, J.; Berthou, P. Y.; Alves, C. A. M.; Palácios, T.; Leal N. & Kullberg, M. C. (1993). *Carta geológica 1:50.000, nº 34-A*, Sintra. Instituto Geológico e Mineiro.

- Ramalho, M.; Rey, J.; Zbyszewski, G.; Alves, C. M.; Almeida, F. M.; Costa, C. & Kullberg, M. C. (2001). Notícia Explicativa da Carta geológica 1:50.000, nº 34-C, Cascais. Lisboa, Instituto Geológico e Mineiro.
- RETScreen (2015). Natural Resources Canada. Disponível em: <http://www.retscreen.net/ang/home.php> [Acedido em 10 11 2015].
- Schibuola, L. & Scarpa, M. (2016). Experimental analysis of the performances of a surface water source heat pump. *Energy and Buildings*, 113, 182–188.
- Serway, R. & Jewett, J. (2014). *Physics for Scientists and Engineers*. 9 ed. Brooks/Cole Cengage Learning.
- Skarphagen, H. (2006). Grunnvarme - Varmevæksling med grunnen [Ground source heat – heat exchange with the ground - in Norwegian]. Universidade de Oslo.
- Soni, S. K.; Pandey, M. & Bataria, V. N. (2015). Ground coupled heat exchangers: A review and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 83–92.
- Soares, J. F. A. M. A. & M. J. (2007). *Avaliação de projectos de investimento na óptica empresarial*. Lisboa, Silabo.
- Self, S. J.; Reddy, B. V. & Rosen M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*.
- Trading Economics, (2016). Trading Economics. Disponível em: <http://www.tradingeconomics.com/portugal/bank-lending-rate> [Acedido em 21 6 2016].
- U.S. Department of Energy (2015). Energy.Gov. Disponível em: <http://energy.gov/energysaver/geothermal-heat-pumps> [Acedido em 3 Novembro 2015].
- V. Badescu (2007). Economic aspects of using ground thermal energy for passive house heating. *Renewable Energy*, Volume 32.
- Zbyszewski, G. (1963). Carta geológica dos arredores de Lisboa na escala 1:50000, Notícia explicativa da folha 4 (Lisboa). Lisboa: Serv. Geol. Portugal.
- Zbyszewski, G. (1964). Carta geológica dos arredores de Lisboa na escala 1:50000, Notícia explicativa da folha 2 (Loures). Lisboa: Serv. Geol. Portugal
- Zhu, N., Hu, P.; Wang, W.; Yu, J. & Lei, F. (2015). Performance analysis of ground water-source heat pump system with improved control strategies for building retrofit. *Renewable Energy*, 80, 324–330.



**Anexo 1 - Parâmetros térmicos necessários à obtenção do valor de transferência de calor por transmissão através da envolvente, segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013.**

Tabela A 1 – Valores por defeito para os coeficientes de transmissão térmica linear em  $W/(m \cdot ^\circ C)$ .

<b>Tipo de ligação</b>	<b><math>\psi</math> [W/(m.°C)]</b>
Fachada com pavimentos térreos Fachada com pavimento sobre o exterior ou local não aquecido Fachada com cobertura Fachada com pavimento de nível intermédio Fachada com varanda	0,70
Duas paredes verticais em ângulo saliente	0,50
Fachada com caixilharia Zona da caixa de estore	0,30

Tabela A 2 - Valores do coeficiente de transmissão térmica por elementos em contacto com o solo.

<b>z [m]</b>	<b>Pavimento enterrado <math>U_{bf}</math> [W/m<sup>2</sup>.°C]</b>	
	<b><math>R_f &lt; 0,75</math></b>	<b><math>R_f \geq 0,75</math></b>
<1	1,0	0,6
$1 \leq z \leq 3$	0,8	0,6
$\geq 3$	0,6	0,4

onde  $R_f$  equivale à resistência térmica do pavimento em contacto com o solo, com exclusão das resistências térmicas superficiais interiores,  $R_{si}$ , e exterior,  $R_{se}$ , ambas em  $m^2 \cdot ^\circ C/W$ .

## Anexo 2 – Envoltente Exterior do Edifício.

Tabela A 3 - Resistências térmicas dos materiais que compõem as paredes em contacto com o exterior do edifício, e coeficiente de transmissão térmica da parede.

Resistências Térmicas	Espessura [m]	$\lambda$ [W/m.°C]	$R_j$ [(m <sup>2</sup> .°C)/W]
Revestimento cerâmico exterior	0,02	1,3	0,02
Reboco	0,02	1,3	0,02
Alvenaria tijolo cerâmico furado	0,15	-	0,39
Caixa-de-ar	0,02	-	0,18
Poliestireno expandido extrudido (XPS)	0,04	0,037	1,08
Alvenaria em tijolo furado	0,11	-	0,27
Gesso (estruque) tradicional	0,02	0,4	0,05
$\sum_j$ Espessura	0,38		

$\sum_j R_j$	2,00
$R_{se}$	0,04
$R_{si}$	0,13
U [W/(m <sup>2</sup> .°C)]	0,46

Tabela A 4 - Resistências térmicas dos materiais que compõem a cobertura do Piso 2 do edifício, que está em contacto com o exterior. Coeficiente de transmissão térmica do teto do Piso 2.

Resistências Térmicas	Espessura [m]	$\lambda$ [W/m.°C]	$R_j$ [(m <sup>2</sup> .°C)/W]
Revestimento exterior	0,020	1,30	0,020
Betonilha de regularização	0,100	1,30	0,080
Poliestireno extrudido	0,040	0,04	1,080
Tela impermeabilizante	0,006	0,70	0,009
Betonilha de assentamento	0,100	1,30	0,080
Betão armado	0,200	2,30	0,090
Gesso (estruque) tradicional	0,020	0,40	0,050
$\sum_j$ Espessura	0,530		

$\sum_j R_j$	1,400
$R_{se}$ ascendente	0,040
$R_{si}$ ascendente	0,100
U [W/(m <sup>2</sup> .°C)]	0,651

Tabela A 5 - Resistências térmicas dos materiais que compõem a laje do Piso 0 do edifício, que está em contacto com solo. Coeficiente de transmissão térmica da laje do Piso 0.

<b>Resistências Térmicas</b>	<b>Espessura [m]</b>	<b><math>\lambda</math> [W/m.°C]</b>	<b><math>R_j</math> [(m².°C)/W]</b>
Revestimento cerâmico	0,02	1,30	0,02
Betonilha de assentamento	0,10	1,30	0,08
Poliestireno expandido extrudido	0,04	0,04	1,08
Betão armado	0,24	2,30	0,10
$\sum_j$ Espessura	0,40		

$\sum_j R_j$	1,28
$U_f$ [W/(m².°C)]	0,60

**Anexo 3 – Envoltente Interior do edifício.**

Tabela A 6 - Resistências térmicas dos materiais que compõem as paredes interiores do edifício, e coeficiente de transmissão térmica da parede.

<b>Resistências Térmicas</b>	<b>Espessura</b> <b>[m]</b>	<b><math>\lambda</math></b> <b>[W/m.°C]</b>	<b><math>R_j</math></b> <b>[(m<sup>2</sup>.°C)/W]</b>
Gesso (estruque) tradicional	0,02	0,400	0,05
Alvenaria com tijolo furado	0,11	-	0,27
Gesso (estruque) tradicional	0,02	0,400	0,05
$\sum_j$ Espessura	0,15		

$\sum_j R_j$	0,37
$R_{se}$	0,13
$R_{si}$	0,13
<b>U</b> <b>[W/(m<sup>2</sup>.°C)]</b>	1,59

**Anexo 4 – Fator de utilização de ganhos, segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, 3 de Dezembro 2013.**

Tanto na estação de aquecimento como na de arrefecimento, os respetivos fatores de utilização dos ganhos térmicos ( $\eta_i$ ) e ( $\eta_v$ ) são obtidos de acordo com as restrições propostas no Despacho n.º 15793-K/2013, demonstradas nas alíneas a), b) e c).

a) Se,  $\gamma \neq 1$  e  $\gamma > 0$ ,

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \quad (\text{A-1})$$

b) Se,  $\gamma = 1$ ,

$$\eta = \frac{a}{a + 1} \quad (\text{A-2})$$

c) Se,  $\gamma < 0$ ,

$$\eta = \frac{1}{\gamma} \quad (\text{A-3})$$

em que, o parâmetro “a” traduz a influência da classe de inércia térmica do edifício, onde de acordo com o Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013, 3 de Dezembro 2013, pode tomar os diferentes valores representados na Tabela A 7. O parâmetro “ $\gamma$ ” é obtido através da equação (A-4),

$$\gamma = \frac{Q_g}{Q_{tr} + Q_{ve}} \quad (\text{A-4})$$

onde:

- $Q_{tr}$  representa a transferência de calor por transmissão através da envolvente do edifício na estação em estudo, em kWh;
- $Q_{ve}$  representa a transferência de calor por ventilação na estação em estudo, em kWh;
- $Q_g$  representa os ganhos térmicos brutos na estação em estudo, em kWh.

Tabela A 7 – Valor do parâmetro “a” para as diferentes classes de inércia interior, segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013, 3 de Dezembro 2013.

<b>Classe de inércia térmica do interior do edifício</b>	<b>Parâmetro “a”</b>
Fraca	1,8
Média	2,6
Forte	4,2

“**Nota**” – Para o edifício do caso de estudo desta dissertação, não se verificam os requisitos necessários para classificar a classe de inércia térmica em Forte ou Fraca. Sendo assim, é aplicada a

classe Média de inércia térmica. Esta simplificação é aplicada de acordo com o Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013, 3 de Dezembro 2013.

Tabela A 8 – Cálculo do fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento ( $\eta_i$ ), obtido de acordo com as restrições do presente Anexo, alíneas a), b), e c).

$Q_{tr,i}$	$Q_{ve,i}$	$Q_{g,i}$	$\gamma$	$a$	$\eta_i$
[MWh]	[MWh]	[MWh]	[-]	[-]	[-]
40,16	6,83	20,58	0,44	2,6	0,93

Tabela A 9 - Cálculo do fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento ( $\eta_v$ ), obtido de acordo com as restrições do presente Anexo, alíneas a), b), e c).

$Q_{tr,v}$	$Q_{ve,v}$	$Q_{g,v}$	$\gamma$	$a$	$\eta_v$
[MWh]	[MWh]	[MWh]	[-]	[-]	[-]
14,32	2,44	30,42	1,82	2,6	0,49

**Anexo 5 - Parâmetros necessários à obtenção do valor dos ganhos térmicos solares na estação de aquecimento, segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013.**

Tabela A 10 - Fator de orientação para as diferentes exposições,  $X_j$ .

Orientação do vão (j)	N	NE/NW	S	SE/SW	E/W	H
$X_j$	0,27	0,33	1,00	0,84	0,56	0,89

Tabela A 11 - Fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao vão,  $g_{\perp,vi}$ .

Composição do vidro		$g_{\perp,vi}$
Vidro Simples	Incolor 4 mm	0,88
	Incolor 5 mm	0,87
	Incolor 6 mm	0,85
	Incolor 8 mm	0,82
	Colorido na massa 4 mm	0,70
	Colorido na massa 5 mm	0,65
	Colorido na massa 6 mm	0,60
	Colorido na massa 8 mm	0,50
	Refletante Incolor 4 a 8 mm	0,60
	Refletante colorido na massa 4 a 5 mm	0,50
	Refletante colorido na massa 6 a 8 mm	0,45
	Fosco	1,00

Tabela A 12 – Termos obtidos para o cálculo da equação (4-12), em cada piso do edifício, tendo em consideração a orientação dos vãos envidraçados assim como os parâmetros,  $F_w = 0,9$ ;  $g_{L,vi} = 0,6$ ;  $g_{vi} = 0,54$ ;  $F_g = 0,7$  necessários para o cálculo de  $A_{s,i}$  e  $F_s = 0,45$ .

Vãos envidraçados (janelas)						
Orientação	Quantidade	$A_w$ total por piso [m <sup>2</sup> ]	$A_{s,i}$ [m <sup>2</sup> ]	$F_s \cdot A_{s,i}$ [m <sup>2</sup> ]	$X_j$ [m <sup>2</sup> ]	$X_j \cdot (F_s \cdot A_s)$ [m <sup>2</sup> ]
Norte	0	0,0	0,00	0,00	0,27	0,0
Oeste	8	16,2	6,12	2,76	0,56	1,54
Este	9	18,0	6,80	3,06	0,56	1,71
Sul	0	0,0	0,00	0,00	1,00	0,0

Tabela A 13 – Cálculo da quantidade de energia térmica proveniente dos ganhos térmicos para todo o edifício segundo equação (4-9), tendo em consideração parâmetro  $\eta_i = 0,93$  obtido anteriormente na Tabela A 8.

	$Q_{int,i}$ [kWh]	$Q_{sol,i}$ [kWh]	$Q_{g,i}$ [kWh]	$Q_{gu,i}$ [kWh]
Piso 0	4270	2590	6860	6385
Piso 1	4270	2590	6860	6385
Piso 2	4270	2590	6860	6385
Total	12811	7770	20580	19155



**Anexo 6 - Parâmetros necessários à obtenção do valor dos ganhos térmicos solares na estação de arrefecimento, equação (4-20).**

Tabela A 14 - Energia solar acumulada ( $I_{sol}$ ) ao longo da estação de arrefecimento, para a região da Amadora, recebida na Horizontal (inclinação  $0^\circ$ ) e em superfícies verticais (inclinação  $90^\circ$ ) para os quatro pontos cardeais e os quatro colaterais, retirado do Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, 3 de Dezembro 2013.

	Orientação da envolvente (j)					
	H	N	NE/NW	S	SE/SW	E/W
Inclinação da Superfície	$0^\circ$	$90^\circ$	$90^\circ$	$90^\circ$	$90^\circ$	$90^\circ$
$I_{sol}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	840	225	365	410	495	500

Tabela A 15 - Cálculo da equação (4-21) em cada piso do edifício (somatório do final da Tabela), tendo em consideração a orientação dos vãos envidraçados assim como os parâmetros necessários:  $F_w = 0,9$ ;  $g_{L,vi} = 0,6$ ;  $g_{vi} = 0,54$ ;  $F_s \cdot F_g = 0,54$ .

Vãos envidraçados (janelas)					
Orientação	Quantidade	$A_w$ por piso [m <sup>2</sup> ]	$F_s \cdot F_g \cdot A_w \cdot g_{vi}$ [m <sup>2</sup> ]	$I_{sol,j}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$I_{sol,j} \cdot (F_s \cdot F_g \cdot A_w \cdot g_{vi})$ [kWh]
Norte	0	0,0	0,0	225	0
Oeste	8	16,2	4,9	500	2449
Este	9	18,0	5,4	500	2722
Sul	0	0,0	0,0	410	0
$\sum_j I_{sol,j} \cdot (F_s \cdot F_g \cdot A_w \cdot g_{vi})$					5171

Tabela A 16 – Valor do coeficiente de absorção da radiação solar da superfície exterior dos elementos opacos ( $\alpha$ ), necessário ao cálculo de ganhos solares na estação de arrefecimento nas paredes exteriores e coberturas, com base na cor da superfície exterior dos elementos de acordo com o Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, 3 de Dezembro 2013.

Cor	$\alpha$
Clara (branco, creme, amarelo, laranja, vermelho-claro)	0,4
Média (vermelho-escuro, verde-claro, azul-escuro)	0,5
Escura (castanho, verde-escuro, azul-vivo, azul-escuro)	0,8

Tabela A 17 - Cálculo da equação (4-23) para os Piso 0 e Piso 1 ( “Nota” - o valor obtido no somatório do final da tabela é para cada um dos pisos referidos), tendo em consideração a orientação das paredes opacas, o respetivo valor de U retirado da Tabela A 3, assim como os parâmetros necessários para o cálculo de  $A_{s,v}$ :  $\alpha = 0,4$ ;  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ ;  $F_{s,vnj} = 1$ .

Paredes exteriores					
Orientação	$A_{op}$ por piso [m <sup>2</sup> ]	U [W/m <sup>2</sup> ]	$A_{s,v}$ [m <sup>2</sup> ]	$I_{sol,j}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$I_{sol,j} \cdot (A_{s,v})$ [kWh]
Norte	0,0	0,622	0,00	225	0
Oeste	70,5	0,622	0,70	500	350
Este	86,4	0,622	0,86	500	430
Sul	23,8	0,622	0,24	410	97
$\sum_j I_{sol,j} \cdot (A_{s,v})$					877

Tabela A 18 - Cálculo da equação (4-23) para o Piso 2 (somatório do final da Tabela), tendo em consideração a orientação das paredes opacas e Cobertura do Piso, o respetivo valor de U retirado da Tabela A 3 e

Tabela A 4, assim como os parâmetros necessários para o cálculo de  $A_{s,v}$ :  $\alpha = 0,4$ ;  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ ;  $F_{s,vnj} = 1$

<b>Paredes exteriores e Cobertura do Piso 2</b>					
<b>Orientação</b>	<b><math>A_{op}</math> por piso [m<sup>2</sup>]</b>	<b>U [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>A_{s,v}</math> [m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>I_{sol,j}</math> [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>I_{sol,j} \cdot (A_{s,v})</math> [kWh]</b>
<b>Norte</b>	0,0	0,622	0,00	225	0,0
<b>Oeste</b>	70,5	0,622	0,70	500	350,0
<b>Este</b>	86,4	0,622	0,86	500	430,0
<b>Sul</b>	23,8	0,622	0,24	410	97,0
<b>Horizontal</b>	279,8	0,651	2,91	840	2447,5
$\sum_j I_{sol,j} \cdot (A_{s,v})$					3324,5

Tabela A 19 – Cálculo do parâmetro  $Q_{g,v}$  do edifício em estudo de acordo com a equação (4-18), tendo em conta todos os parâmetros obtidos ao longo do presente Anexo.

<b>Equação</b>	<b>Parâmetro calculado</b>	<b>Piso 0</b>	<b>Piso 1</b>	<b>Piso 2</b>	<b>Edifício</b>
(4-19)	$Q_{int}$ [kWh]	3276,5	3276,5	3276,5	9829,6
(4-22)	$Q_{sol, envoltente envidraçada}$ [kWh]	5171,0	5171,0	5171,0	15513,0
(4-23)	$Q_{sol, envoltente opaca}$ [kWh]	877,0	877,0	3324,5	5079,0
(4-18)	$Q_{g,v}$ [kWh]	9324,6	9324,6	11772,1	30421,4

**Anexo 7 - Exemplo de unidades de bomba de calor geotérmico água-água, para aquecimento e produção de AQS.**

Tabela A 20 – Duas marcas de fabricantes de unidades de BCG, comercializadas na Península Ibérica, com potências nominais suficientes de modo a cobrir 100% das necessidades de pico de carga nas estações de aquecimento e arrefecimento (CYPE Ingenieros, S.A., 2016).

<b>Marca</b>	<b>Buderus</b>	<b>Ecoforest</b>
<b>Modelo</b>	Logatherm Wps 23 R	ecoGEO B4 5-22
<b>Alimentação</b>	Trifásica	Trifásica
<b>Potência Frigorífica Nominal [kW]</b>	22,5	29
<b>Potência Calorífica Nominal [kW]</b>	23	25
<b>EER</b>	3,88	5
<b>COP</b>	4,69	4,9

**Anexo 8 - Características da Unidade água-água bomba de calor geotérmico, para aquecimento, produção de AQS, escolhida para o caso de estudo.**

Unidade água-água bomba de calor geotérmico, para aquecimento, produção de AQS (em combinação com um depósito com permutador independente) e refrigeração ativa e passiva, modelo *ecoGEO B4 5-22 "ECOFOREST"*, para gás refrigerante R-410A, alimentação trifásica a 400 V, potência calorífica nominal regulável até 25 kW, potência frigorífica nominal regulável até 29 kW, COP 4,9, EER 5, dimensões 1060x600x710 mm, potência sonora 46 dBA, peso 193 kg, com compressor *scroll* com tecnologia *Inverter Copeland* com motor elétrico de ímanes permanentes, controlo *Micro PC Carel*, bombas de circulação *Wilo* de velocidade variável e alta eficiência (classe energética A), válvula de expansão eletrónica *Carel*, permutadores de placas *Alfa Laval*, resistência elétrica de emergência, sistema HTR de recuperação do calor gerado pelo compressor, vaso de expansão de 8 litros, grupo de segurança e *kit* de isolamento acústico integral, com possibilidade de ligar em cascata até 3 unidades e com possibilidade de gerir até 4 grupos de impulsão, para um circuito direto e três circuitos com válvula misturadora, com sondas de imersão e sonda de temperatura exterior (CYPE Ingenieros, S.A., 2016).

Tabela A 21 – Descrição detalhada dos preços da instalação de unidade de BCG escolhida para o caso de estudo (CYPE Ingenieros, S.A., 2016).

Descrição	Unidade	Preço Unitário [€]	Total [€]
Unidade água-água bomba de calor geotérmico, para aquecimento, produção de A.Q.S. (em combinação com um depósito com permutador independente) e refrigeração ativa e passiva, modelo <i>ecoGEO B4 5-22 "ECOFOREST"</i> .	1 Unidade	10390	10390
Filtro de retenção de resíduos de latão, com peneiro de aço inoxidável com perfurações de 0,5 mm de diâmetro, com rosca de 1 1/4", para uma pressão máxima de funcionamento de 16 bar e uma temperatura máxima de 110°C.	2 Unidades	19	38
União anti-vibração, de borracha, com rosca de 1", para uma pressão máxima de funcionamento de 10 bar.	2 Unidades	17	33
União anti-vibração, de borracha, com rosca de 1 1/4", para uma pressão máxima de funcionamento de 10 bar.	4 Unidades	19	76
Termómetro bimetálico, diâmetro de esfera de 100 mm, com tomada vertical, com bainha de 1/2", escala de temperatura de 0 a 120°C.	1 Unidade	21	21
Válvula de esfera de latão niquelado para enroscar de 1".	6 Unidades	10	59
Válvula de esfera de latão niquelado para enroscar de 1 1/4".	4 Unidades	15	61
Grupo para enchimento do circuito com glicol, "ECOFOREST", com válvula de esfera de 1 1/4" e filtro de malha de 0,6 mm.	1 Unidade	110	110
Material auxiliar para instalação de aquecimento com unidade água-água bomba de calor geotérmico <i>EcoGEO BASIC</i> , "ECOFOREST".	1 Unidade	750	750
Oficial de 1º instalador de ar condicionado.	34 horas	17	592
Ajudante de instalador de ar condicionado.	34 horas	16	558
Custos diretos complementares	2 %	12688	254
"Nota" Custo de manutenção decenal: 8917,73€.		$\sum$ Total	12942 €

**Anexo 9 - Características do sistema geotérmico vertical, escolhido de acordo com o dimensionamento efetuado no caso de estudo.**

Sonda geotérmico simples, para instalação vertical, de 100 m de comprimento e 96 mm de diâmetro, formada por tubo de polietileno de alta densidade (PE 100) de 32 mm de diâmetro e 2,9 mm de espessura, SDR11, com tubo de injeção, distanciadores para tubos e argamassa preparada de bentonite e cimento.

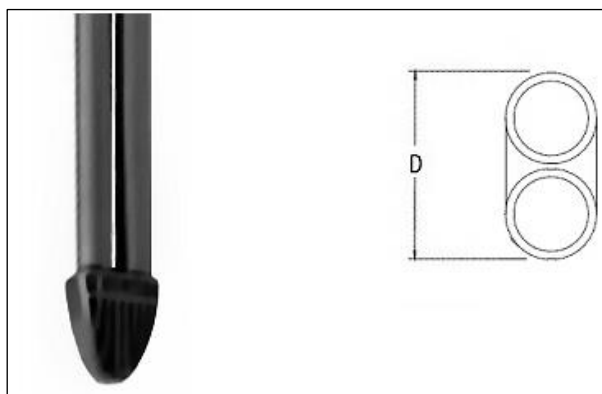


Figura A 1 – Exemplo de sonda geotérmico simples de PE com Diâmetro D = 96 mm (CYPE Ingenieros,S.A., 2016).

Tabela A 22 - Descrição detalhada do preço da instalação de 1 sonda do sistema geotérmico vertical, apropriado para o dimensionamento efetuado no caso de estudo (CYPE Ingenieros,S.A., 2016).

Descrição	Unidade	Preço Unitário [€]	Total [€]
Instalação da Sonda geotérmica vertical, de 100 m de comprimento e 96 mm de diâmetro, formada por tubo de polietileno de alta densidade (PE 100), 32 mm de diâmetro e 2,9 mm de espessura, SDR11, e um pé com forma de V, ao que são soldados os tubos, peso da sonda 272,25 kg, temperatura de trabalho entre -20°C e 30°C, fornecida em rolos.	1 Unidades	447,5	447,5
Distanciador para tubos, 2 x 32 mm, com orifício central de 45 mm de diâmetro para condução do tubo de injeção, para sonda geotérmica vertical.	14 Unidades	4,4	61,6
Argamassa preparada de bentonite e cimento, de condutibilidade térmica mínima 2,4 W/(m°C), baixa permeabilidade à água, resistente a geadas, densidade 1800 kg/m³, resistência mecânica à compressão 10 N/mm², para injeção e enchimento de sonda geotérmica vertical.	1800 kg	0,7	1260,0
Oficial de 1ª instalador de aquecimento.	3 horas	17,4	53,1
Ajudante de instalador de aquecimento.	3 horas	16,4	50,1
Custos diretos complementares	2 %	1998,8	39,9
"Nota" Custo de manutenção decenal: 156,75 €.		$\sum$ Total	2038,8 €

Tabela A 23 – Cálculo do sistema geotérmico vertical de acordo com o dimensionamento efetuado no caso de estudo.

Comprimento do furo obtido no dimensionamento (CF)	Comprimento da sonda a instalar (CS)	Número de Furos (CF/CS)	Preço da instalação de 1 sonda por furo	Total
579 m	100 m	6	2038,8 €	12232,9 €

### Anexo 10 - Características do sistema geotérmico de água subterrânea, escolhido de acordo com o dimensionamento efetuado no caso de estudo

Tabela A 24 - Descrição detalhada do preço da instalação do permutador central necessário para o sistema geotérmico de água subterrânea, apropriado para o dimensionamento efetuado no caso de estudo (CYPE Ingenieros,S.A., 2016).

Descrição	Unidade	Preço Unitário [€]	Total [€]
Permutador de placas de aço inoxidável AISI 316, potência 25 kW, pressão máxima de trabalho 6 bar e temperatura máxima de 100°C.	1 Unidades	80,0	80,0
Válvula de esfera de latão niquelado para enroscar de 1".	2 Unidades	9,8	19,6
Válvula de esfera de latão niquelado para enroscar de 1 1/4".	2 Unidades	15,23	30,5
Manómetro com banho de glicerina e diâmetro de esfera de 100 mm, com tomada vertical, para montagem roscado de 1/2", escala de pressão de 0 a 5 bar.	4 Unidades	11,0	44,0
Termómetro bimetalico, diâmetro de esfera de 100 mm, com tomada vertical, com bainha de 1/2", escala de temperatura de 0 a 120°C.	4 Unidades	21,0	84,0
Material auxiliar para instalações de A.Q.S.	1 Unidades	1,5	1,5
Oficial de 1ª instalador de aquecimento.	1,2 horas	17,4	20,9
Ajudante de instalador de aquecimento.	1,2 horas	16,4	19,8
Custos diretos complementares	2 %	300,3	6,0
"Nota" Custo de manutenção decenal: 64,33€.		$\Sigma$ Total	306,31 €

Tabela A 25 - Descrição detalhada do preço da instalação do sistema de bombagem de águas do poço de fornecimento de água do sistema geotérmico de água subterrânea, apropriado para o dimensionamento efetuado no caso de estudo (CYPE Ingenieros,S.A., 2016).

Descrição	Unidade	Preço Unitário [€]	Total [€]
Transporte, montagem e desmontagem de sistema de bombagem de águas, com bomba submersível de poço, de 25 m³/h, incluindo tubos e acessórios necessários para o correto funcionamento da instalação em poço de bombagem até 14 m de profundidade.	1 Unidade	3568,7	3.586,57
Custos diretos complementares	2 %	3568,7	71,73
		$\Sigma$ Total	3658,3 €



Figura A 2 – Exemplo de sistema de bombagem de águas com bomba submersível de poço (CYPE Ingenieros,S.A., 2016).



**Anexo 11 - Metodologia para estimativa do número de alunos necessários para que a implementação dos sistemas geotérmicos considerados seja indiferente financeiramente, ou seja, o valor do VAL é zero.**

A metodologia utilizada encontra-se descrita nos seguintes pontos:

1 - As necessidades energéticas do edifício em estudo são de 74,19 MWh e 25,76MWh, respetivamente para o aquecimento e arrefecimento. O sistema foi dimensionado inicialmente para a capacidade máxima do edifício, 78 alunos, obtendo um rácio de 951,20 kWh/aluno para a energia de aquecimento e 330,21kWh para a energia de arrefecimento.

Tabela A 26 – Rácio da necessidade energia útil por aluno, ano.

	Aquecimento	Arrefecimento
<b>Necessidades de energia útil</b>	74,19 MWh	25,76MWh
<b>Percentagem da energia útil total</b>	74%	26%
<b>Rácio</b>	951,20 kWh/aluno	330,21 kWh/aluno

2 - Mantendo os custos, a taxa de desconto e tempo de vida do projeto constantes, é utilizado a função *Solver* do *software Excel* para obter as poupanças anuais de energia final para os sistemas considerados (Tabela A 27).

3 - Tendo em conta os valores obtidos no ponto 2, mantendo as percentagens de energia útil para aquecimento e arrefecimento da Tabela A 27, assim como, os preços da eletricidade e gás natural, é utilizado mais uma vez a função *Solver* do *software Excel* para obter a quantidade de energia necessária para aquecimento e arrefecimento (Tabela A 27).

4 - Uma vez obtido os valores do ponto 3 é possível através dos rácios apresentados na Tabela A 26, obter os resultados de 44 alunos e 32 alunos para o sistema vertical e sistema de água subterrânea, respetivamente (Tabela A 27).

Tabela A 27 – Resultados dos pontos 2,3 e 4 da metodologia apresentada neste anexo.

<b>Tipo de sistema BCG</b>	Sistema Vertical	Sistema de Água subterrânea
VAL	0 €	0 €
<b>Poupança anual em energia poupança Obtida com o Solver (Ponto 2)</b>	2537 €	1867 €
<b>Energia necessária pra Aquecimento (Ponto 3)</b>	41,64 MWh	30,40 MWh
<b>Energia necessária pra Arrefecimento (Ponto 3)</b>	14,46 MWh	10,55 MWh
<b>Número de alunos equivalente</b>	44	32

