Análise Energética de um Edifício Público com utilização de bomba de calor geotérmica

Filipa Sucena Gomes

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof.ª Ana Isabel Palmero Marrero

Coorientador: Eng.º António João Ribeiro Sousa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro 2019

Resumo

O principal foco do trabalho consiste no reaproveitamento do potencial geotérmico local (usado para tratamentos termais) para climatização e produção de águas quentes sanitárias do complexo Termal Fonte Santa, de modo a reduzir os consumos energéticos globais e aumentar a eficiência energética do edifício. Este situa-se no concelho de Almeida, distrito da Guarda. Para promover o uso de energias renováveis neste sistema, analisou-se ainda a colocação de painéis solares fotovoltaicos para alimentar a edificação de forma a evitar o consumo excessivo de eletricidade desde a rede. Deste modo, foi modelado integralmente o edifício, as bombas de calor geotérmicas e o sistema fotovoltaico.

Numa fase inicial, procedeu-se ao levantamento dimensional do edifício em estudo. A modelação do mesmo foi possível através do *software REVIT*, que facilitou a entrada de dados no *software* de simulação dinâmica usado na simulação, *TRACE 700*. Posteriormente, para simular o comportamento térmico do edifício em causa, foi realizado um levantamento exaustivo de todos os elementos necessários à sua caracterização. Em todo o processo de simulação tentou-se respeitar as normas presentes da especialidade segundo a legislação nacional, nomeadamente o SCE e RECS. Posteriormente, o modelo foi simulado e calibrado com o objetivo de se aproximar o máximo possível do comportamento energético real do edifício, e obter as necessidades energéticas do edifício durante todo o ano. Constatou-se que os valores dos consumos de energia obtidos por simulação dinâmica apresentaram um desvio significativamente inferior a +/- 10% do consumo energético faturado, tanto em relação à fatura elétrica como à fatura de gás natural, o que, segundo o sistema de certificação energética dos edifícios (SCE), significa que o modelo se encontra calibrado. O consumo energético de eletricidade e de gás, resultante da simulação, correspondeu a 216,63 MWh_{elec}/ano e 486,84 $MWh_{gás}$/ano respetivamente, sendo as necessidades globais correspondentes a 792,92 MWh/ano.

Após calibração e análise energética e económica da solução existente, a dissertação estudou a viabilidade da implementação de equipamentos de produção de energia térmica mais eficientes nomeadamente as bombas de calor geotérmica, com o intuito de otimizar os consumos energéticos do edifício, tendo sempre em conta a viabilidade económica. Para tal, foram idealizados dois cenários: o primeiro em que se avaliou um chiller de condensação a água a trabalhar apenas para satisfazer as necessidades de arrefecimento e a rejeitar a condensação para a permuta com a geotermia, e o segundo cenário que consistiu em analisar um chiller/bomba de calor para satisfazer simultaneamente as necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício, também a aproveitar o recurso à permuta com a geotermia. No final, foi ainda avaliada a inserção de um sistema solar fotovoltaico, com o intuito de reduzir o consumo anual de energia elétrica. Esta medida de racionalização energética foi implementada na solução B, onde os consumos de energia totais já revelavam uma redução significativa relativamente à solução existente. Foi realizada uma análise energética e económica para cada solução, sempre em comparação com a solução já existente (caldeira a gás natural e chiller de condensação a ar). A solução B, com o sistema fotovoltaico inserido, apresentou valores bastante satisfatórios, tendo reduzido o consumo de energia total para 407,92 MWh/ano, correspondente a uma redução de 49% dos consumos iniciais. Apesar do seu investimento inicial ser elevado, comparativamente aos sistemas convencionais, este apresenta um retorno de investimento de 3,5 anos. Foi ainda determinada a classificação energética de cada solução, através do cálculo do índice de eficiência energética (IEE). Relativamente à análise da solução B com a instalação do sistema fotovoltaico, o edifício apresenta uma melhoria da sua classe energética, passando de C para B^-.

Importante ainda salientar que o presente trabalho, que envolveu a modelação de um edifício, promoveu o desenvolvimento da capacidade de pensamento crítico, e de otimização de soluções.

Energy Analysis of a Public Building using a Geothermal Heat Pump

Abstract

The aim of this work consists in the reutilization of the local geothermal potential (used for thermal treatments) for the air conditioning and hot water prodution of the Fonte Santa Thermal Complex, in order to reduce the global energy comsuption and improve the energy efficiency of the building. The building is in Almeida, district of Guarda. To promote the usage of renewable energy in this system, it was also studied the installation of a photovoltaic solar system in order to avoid excessive electricity consumption from the grid. This way, the building, the geothermal heat pump and the photovoltaic system were fully modeled.

At first, it was proceeded with the whose building's dimensional survey. The projection of this building was possible through REVIT software, that helped in data entrance to the dynamic simulation software used in the simulation TRACE 700. After that, in order to simulate the building's thermal behavior, was performed an exhaustive survey of all elements for the building's necessary characterization. Throughout the simulation process the respect of the standards of the specialty according to national legislation, SCE and RECS was tried to maintain. The model was simulated and calibrated in order to get the most real behavior of the building and to obtain the energetic global needs. In fact, the values of energy consumption obtained in the dynamic simulation showed only a variation of 1% of the energy consumption from the bills, in other words, the model is calibrated, according to Energy Certification System. Eletricity and gas consumption resulting from the simulation corresponded to 216,63 MWh_{elec}/year and 486,84 $MWh_{gás}$/year repectively, and the global needs are set at 792,92 MWh/year. After the current's solution calibration and energy analyses, it's verified the sustainability of implementing more efficient thermal energy production equipment, as a geothermal heat pump, in order to improve the energy consumption of the building, always taking into account the economic sustainability. In this case, two scenarious were proposed: the first consisted in the evaluation of a water chiller working exclusively for cooling purpose, and the second one in the analysis of a chiller/heat pump to simultaneously solve the heating and cooling needs of the building. At the end, it was also analysed the placement of a solar photovoltaic system, in order to reduce the yearly eletricity consumption. This energy rationalize measure was added in the second solution (B' solution), where total energy consumption reduction was already significant compared to the existing solution. It was also performed a energy and economy analysis for each solution, always comparing to the existing one (gas boiler and air condensing chiller). The B' solution, with the photovoltaic system included, presented very satisfactory values, reducing total energy consumption to 407,92 MWH/year corresponding to a reduction of 49% of the initial consumption. Even though it's a high value initial investment, compared to others conventional systems, it only takes 3,5 years to obtain the payback. The energy classification of each solution was also introduced by calculating the energy efficiency índex (IEE). Regarding the B solution analysis and the photovoltaic system, the building had a energy class improvemnt from C to B^{-}.

The presente work, which involved the modeling and simulation of a building, promoted the development of critical thinking capacity and solution optimization

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer à minha orientadora, Professora Ana Palmero, pela excelente oportunidade que me proporcionou a realização deste projeto de dissertação, por todo o apoio e disponibilidade prestados ao longo da orientação, e ainda, por fazer questão de me garantir sempre as melhores condições para que este trabalho apresentasse resultados.

Um grande agradecimento para o Engenheiro João Sousa, que me acompanhou desde o início até ao fim do projeto, por todo o tempo e recursos que disponibilizou, por todos os contactos que estabeleceu para me garantir as melhores soluções, e por todos os conhecimentos transmitidos que, acima de tudo, me fizeram acentuar o estímulo pelo conhecimento e interesse na área em causa.

Agradeço à *TRANE Company* pela licença cedida do *software TRACE 700*, que foi fulcral na realização deste trabalho.

Agradeço à arquiteta Marta Almeida, pela disponibilidade para ajudar na utilização do *software REVIT*, que me permitiu e facilitou a realização da planta de arquitetura relativa ao edifício em estudo.

Agradeço ao Técnico Rui Beites, da *ACSolutions*, pela total disponibilidade na seleção dos permutadores de calor, bem como no fornecimento das fichas técnicas dos mesmos.

Um especial obrigado à minha família, principalmente aos meus pais, à minha irmã e à minha avó que estiveram sempre presentes. Por todos os valores que sempre me transmitiram, por toda a compreensão e pelo incentivo e confiança depositada em mim todos os dias.

Agradeço ao Afonso, que nunca deixou de acreditar nas minhas capacidades e que sempre me levou a sonhar mais alto. Obrigado por todo o apoio e paciência.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer a todos os meus amigos, que tornaram este percurso bonito à sua maneira, cheio de felicidade, aprendizagem e crescimento pessoal, e contribuíram para que chegasse até aqui.

Índice de Conteúdos

1 Introdução 1
1.1 Enquadramento do projeto 1
1.2 Motivação 1
1.3 Objetivos do projeto 3
1.4 Estrutura da dissertação 3
2 Estado de Arte 5
2.1 Energia Geotérmica 5
2.2 Sistemas Geotérmicos Estimulados 8
2.3 Geotermia em Portugal Continental 9
2.4 Geotermia no Arquipélago dos Açores 11
2.4.1. Aproveitamentos Geotérmicos em São Miguel 11
2.4.2. Aproveitamentos Geotérmicas na Ilha Terceira 12
2.5 Enquadramento legal do aproveitamento geotérmico 13
2.6 Bombas de Calor 14
2.6.1. Fluidos de Trabalho Frigorigéneos 16
2.7 Bombas de Calor Geotérmicas 16
2.7.1. Bombas de calor acopladas ao solo (BCAS) 18
2.7.1.1. Circuito Vertical 18
2.7.1.2. Circuito Horizontal 19
2.7.2. Bombas de Calor de Circuito Aberto 19
2.8 Permutadores de Calor 20
2.9 Visão geral sobre o *software* de simulação dinâmica *TRACE 700* 22
3 Enquadramento do Caso de Estudo 24
3.1 Caracterização Geral do Edifício 24
3.2 Localização e Caracterização Geológica do Município de Almeida 25
3.3 Caracterização Climática do Município de Almeida 26
3.4 Caracterização da Envolvente do Edifício 27
3.4.1. Cobertura 29
3.4.2. Vãos envidraçados 30
3.5 Inércia Térmica 31
3.6 Condições exteriores de projeto 32
3.7 Condições interiores de projeto - Caracterização dos espaços 32
3.7.1. Densidades de Ocupação, Equipamentos e Iluminação 32
3.7.2. Caudais mínimos de ar novo 33
3.8 Definição do Sistema Convencional de Ventilação e Climatização 34

3.8.1. Sistema de Ventilação 34
3.8.2. Unidades Produtoras de Aquecimento/Arrefecimento 35
3.9 Águas Quentes Sanitárias (AQS) 36
4 Simulação Dinâmica do Edifício 37
4.1 Enquadramento Regulamentar 37
4.2 Metodologia Aplicada ao Caso de Estudo 38
4.2.1. Introduzir informação climática ("*Select Weather Information*") 39
4.2.2. Criação de *templates ("Create Templates")* 39
4.2.3. Criação de espaços ("*Create Rooms*") 40
4.2.4. Modelação do espaço Piscina 41
4.2.5. Criação dos Sistemas de Climatização ("*Create Systems*") 42
4.2.6. Criação das Plantas ("Create Plants") 44
4.2.7. Definir a Economia ("*Define Economics*") 45
4.2.7.1. Tarifário elétrico 45
4.2.7.2. Tarifário Gás Natural 46
4.2.8. Cálculo dos Resultados ("*Calculate and View Results*") 47
4.3 Resultados 47
4.3.1. Necessidades Térmicas de Arrefecimento (Consumo Eletricidade) 48
4.3.2. Necessidades Térmicas de Aquecimento (Consumo Gás Natural) 48
4.3.3. Incerteza na Modelação 49
4.3.4. Caracterização energética da solução existente 50
4.3.5. Emissões de CO_2 52
4.3.6. Indicador de Eficiência Energética Efetivo do edifício 52
4.3.7. Análise Económica 53
5 Soluções Propostas para aumento de eficiência energética 54
5.1 Solução A - Chiller de condensação a água em modo de arrefecimento a rejeitar a condensação para a geotermia 55
5.1.1. Diagrama de Princípio e Modo de Funcionamento 55
5.1.2. Modelação Dinâmica 57
5.1.3. Resultados e Análise Energética 58
5.1.4. Emissões de CO_2 59
5.1.5. Análise económica 60
5.2 Solução B – Chiller/Bomba de calor reversível com recuperação de calor em ambos os ciclos em modo aquecimento e arrefecimento 62
5.2.1. Diagrama de princípio e Modo de Funcionamento 62
5.2.2. Modelação Dinâmica 64
5.2.3. Resultados e Análise Energética 65
5.2.4. Emissões de CO_2 66

5.2.5. Análise Económica 66
5.3 Solução C – Sistema Fotovoltaico 68
5.3.1. Regime de autoconsumo – Decreto-Lei n.º 153/2014 68
5.3.2. Modelação Dinâmica 69
5.3.3. Resultados e Análise Energética 70
5.3.4. Emissões de CO_2 71
5.3.5. Análise Económica 72
5.4 Comparação energética e económica das 3 alternativas 74
5.4.1. Análise da Classificação Energética 75
6 Conclusões 77
7 Trabalhos futuros 79
Referências 80
Anexos 84
Anexo A – Plantas do Edifício (*Software REVIT*) 84
Anexo B – Cálculo dos Coeficientes de Transmissão Térmica (U) 85
Anexo C – Cálculo da Inércia Térmica 86
Anexo D – Perfis de utilização do Edifício 87
Anexo E - Levantamento dimensional por sistema de climatização 90
Anexo F – Ventiloconvectores 91
Anexo G - Perfil AQS 92
Anexo H – Dados Climáticos da Região Almeida 93
Anexo I – Faturas Energéticas 94
Anexo J – Consumos Energéticos por utilização final: *TRACE 700* 96
Anexo K – Ficha técnica: Permutadores de Calor em Modo Arrefecimento (Solução A) 97
Anexo L – Ficha Técnica Chiller (para solução B) 98
Anexo M – Ficha técnica módulo fotovoltaico 100
Anexo N – Resultados da simulação do sistema fotovoltaico (*PVsyst)* ..... …101

Lista de Siglas

ADENE – Agência para a Energia

AQS – Águas Quentes Sanitárias

ASHRAE – American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BCG – Bomba de Calor Geotérmica

COP – Coeficiente de Performance ou Coeficiente de Desempenho

CVRMSE – *Coefficient of Variation of the Room Mean Square Error*

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

DL – Decreto-Lei

EDP – Energias de Portugal

EER – *Energy Efficiency Rate*

EPW – *Energy Plus Weather File*

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

FV – Fotovoltaico

GEE – Gases com Efeito de Estufa

GSHP – Ground Source Heat Pump

IEE – Índice de Eficiência Energética

kWp – Kilowatt Pico

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

mca – Metros Coluna de Água

MT – Média Tensão

NMBE – *Normalized Mean Bias Error*

PPGS – Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial

QAI – Qualidade do Ar Interior

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

REH – Regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação

RESC – Regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços

RESP – Rede Elétrica de Serviço Público

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios

TMY – *Typical Meteorological Year*

TRACE 700 – Trane Air Conditioning Economics

UD – Unidade Desumidificadora

UPAC - Unidades de Produção para Autoconsumo

UTA – Unidade de Tratamento de Ar

UTAN – Unidade de Tratamento de Ar Novo

UTV – Unidade de Termoventilação

VAN – Ventilador de Ar Novo

VC – Ventiloconvector

Nomenclatura

A – Área [m^2]

a – Azimute [°]

AN – Ar novo [m^3/h]

A_p – Área de pavimento útil [m^2]

AQU – Potência de aquecimento da unidade de tratamento de ar [kW]

ARR – Potência de arrefecimento da unidade de tratamento de ar [kW]

AT – Ar tratado [m^3/h]

e – Espessura [m]

F_{pu} - Fator de conversão entre energia final e energia primária [kWh_{EP}/kWh]

GD – Graus-dias de aquecimento [°C.dia]

g_T – Fator solar do envidraçado [-]

HR – Humidade relativa [%]

IEE_{ef} – Indicador de Eficiência Energética Efetivo [kWh_{EP}/m^2.ano]

IEE_{REN} – Indicador de eficiência energética renovável [kWh_{EP}/m^2.ano]

IEE_S – Indicador de eficiência energética de consumos do tipo S [kWh_{EP}/m^2.ano]

IEE_T – Indicador de eficiência energética de consumos do tipo T [kWh_{EP}/m^2.ano]

L – Comprimento do painel fotovoltaico [m]

$\dot{m}$ – Caudal mássico [kg/s]

PE – Pressão Efetiva [Pa]

R – Resistência Térmica [m^2.°C/W]

R_{IEE} – Rácio de classe energética [-]

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior [m^2.°C/W]

R_{si} – Resistência térmica superficial interior [m^2.°C/W]

T_{bs} – Temperatura de bolbo seco [°C]

T_{bh} – Temperatura de bolbo húmido [°C]

T_{qs} – Temperatura de saída do lado quente do permutador [°C]

T_{fe} – Temperatura de entrada do lado frio do permutador [°C]

T_{qe} – Temperatura de entrada do lado quente do permutador [°C]

T_{fs} – Temperatura de saída do lado frio do permutador [°C]

U – Coeficiente de Transmissão Térmica [W/m^2.°C]

W_C – Potência Fornecida ao Compressor [W]

€ – Euro

ρ – Densidade [kg/m^3]

λ – Condutividade Térmica [W/m.K]

α – Inclinação do painel fotovoltaico [º]

β – Altura mínima do sol [°]

Índice de Figuras

Figura 1 - Contribuição do impacto da geotermia nas emissões de $CO2$ 2

Figura 2 - Posicionamento de Portugal no campo das energias renováveis (2017) 2

Figura 3 - Estrutura interna da Terra 5

Figura 4 - Diagrama de *Lindal*: Utilizações da energia geotérmica 7

Figura 5 – Sistema Geotérmico Estimulado e sua exploração ……8

Figura 6 - Ocorrências geotérmicas em Portugal Continental e o seu enquadramento tecno-estratigráfico 10

Figura 7 – Central Geotérmica Piloto do Pico Vermelho (3 MW) 11

Figura 8 – Central Geotérmica Piloto do Pico Vermelho 2007 (10 MW) 11

Figura 9 - Evolução da exploração da Central Geotérmica da Ribeira Grande e do Pico Vermelho.... 12

Figura 10 - Central geotérmica Piloto do Pico Alto 12

Figura 11 - Acesso à atividade de exploração de recursos geotérmicos 13

Figura 12 - Áreas de intervenção da PPGS 14

Figura 13 - Princípio básico de uma bomba de calor e os principais constituintes 15

Figura 14 – Representação de sistemas geotérmicos: superficiais abertos (A), fechados verticais (B) e fechados horizontais (C) 17

Figura 15 – Bombas de calor acopladas ao solo: sistema horizontal (esquerda) e sistema vertical (direita) 18

Figura 16 - Bombas de calor geotérmicas de circuito fechado horizontal: Circuito simples (à esquerda), circuito em série e circuito em paralelo (à direita) 19

Figura 17 - Bombas de calor geotérmico de circuito aberto 19

Figura 18 - Permutador de calor tubo duplo, em co-corrente (à esquerda) e em contra-corrente (à direita) 21

Figura 19 - Permutador de Placas 21

Figura 20 - Diagrama funcional do *TRACE 700* (Adaptado de TRACE700 User's Manual p.2-3) …. 23

Figura 21 – Edifício Termal de Fonte Santa, Almeida..... 24

Figura 22 - Localização Geográfica das Termas de Fonte Santa. 25

Figura 23 - Orientação do edifício: nordeste 25

Figura 24 - Zonas Climáticas de Inverno (à esquerda) e Zonas Climáticas de Verão (à direta) 26

Figura 25 - Sistema de produção de arrefecimento das Termas de Fonte Santa. 35

Figura 26 - Sistema de produção de aquecimento das Termas de Fonte Santa. 35

Figura 27 - Navegador de Projeto do *TRACE 700.* 38

Figura 28 - Janela "*Create Templates*" 39

Figura 29 - Modelação em *REVIT* do edifício termal (3D). 40

Figura 30 - Orientação do edifício em REVIT – vista de cima. 40

Figura 31 - Inclinação da cobertura (*AutoCAD*). 41

Figura 32 - Definição do equipamento "Piscina". 42

Figura 33 - Modelação dos equipamentos de produção de energia do edifício: produção de frio (à esquerda) e produção de quente (à direita). 44

Figura 34 - Modelação dos consumos relativos à renovação de água da piscina e AQS. 45

Figura 35 - Calendário de funcionamento do edificio "Termas de Fonte Santa". 47

Figura 36 - Necessidades Térmicas de Arrefecimento. 48

Figura 37 - Necessidades Térmicas de Aquecimento. 49

Figura 38 - Consumo de eletricidade e gás [MWh] do edifício termal ao longo do ano. 50

Figura 39 - Desagregação dos consumos energéticos por utilização final. 51

Figura 40 - Consumo anual de energia [MWh] 53

Figura 41 - Custo anual de exploração de energia [€] 53

Figura 42 – Solicitação das necessidades de arrefecimento ao longo do ano em função da real utilização do edifício 55

Figura 43 - Diagrama de princípio - solução A (modo de arrefecimento). 56

Figura 44 - Modelação das alternativas 1 e 2 57

Figura 45 - Modelação do anel geotérmico. 57

Figura 46 - Desagregação dos consumos energéticos: solução existente e solução A. 58

Figura 47 - Desagregação dos consumos de AVAC: solução existente e solução A. 59

Figura 48 – Retorno económico obtido ao fim de 20 anos de vida útil para a solução A. 61

Figura 49 - Diagrama de princípio do chiller/bomba de calor com funcionamento prioridade - modo aquecimento 63

Figura 50 - Diagrama de princípio do chiller/bomba de calor com funcionamento prioridade - modo arrefecimento 64

Figura 51 - Modelação do chiller. 64

Figura 52 - Desagregação dos consumos energéticos: solução existente e solução B. 65

Figura 53 - Desagregação dos consumos de AVAC: solução existente e solução B. 65

Figura 54 – Retorno económico obtido ao fim de 20 anos de vida útil para a Solução B. 67

Figura 55 - Distância mínima entre painéis fotovoltaicos. 70

Figura 56 - Carta Solar para a latitude do local. 70

Figura 57 - Consumo elétrico do edifício e energia elétrica produzida pelo sistema FV. 70

Figura 58 - Consumos energéticos da solução B + C comparativamente à solução existente. 71

Figura 59 - Retorno económico obtido ao fim de 20 anos de vida útil para a solução B + C. 73

Figura 60 – Desagregaçãos dos consumos energéticos (AVAC) da solução existente e das 3 alternativas simuladas. 74

Figura A.1 - Plantas relativas aos 3 pisos do edifício (*software REVIT*) 84

Figura B.1 - Cálculo do coeficiente de transmissão térmica das paredes do edifício. 85

Figura B.2 - Cálculo do coeficiente de transmissão térmica do pavimento do edifício. 85

Figura D.1 - Perfis de Ocupação relativos às Termas de Fonte Santa. 87

Figura D.2 - Perfis de Iluminação relativos às Termas de Fonte Santa. 88

Figura D.3 – Perfis de Equipamentos relativos às Termas de Fonte Santa. 89

Figura H.1 - Ficheiro climático com os dados para as 8760 horas anuais, relativos ao município de Almeida (gerado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia, LNEG)..... 93

Figura J.1 - Relatório gerado em TRACE 700: consumos energéticos por utilização final (solução existente)..... 96

Figura K.1 - Características técnicas do permutador selecionado para a solução A (apenas em modo arrefecimento) e respetivo preço do equipamento. 97

Figura L.1 - Ficha técnica do chiller/bomba de calor consultado para solução B..... 98

Figura L.2 - Temperaturas de funcionamento do chiller/bomba de calor consultado para solução B e respetivas potências de aquecimento e COP do equipamento..... 99

Figura M.1 - Ficha técnica dos módulos fotovoltaicos (Sunmodule Plus SW 280 Monoblack). 100

Figura N.1 - Resultados da simulação do sistema fotovoltaico (*software PVsyst*). 101

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Aplicações de um permutador. 20
Tabela 2 - Classificação de um permutador de calor quanto ao tipo construtivo. 20
Tabela 3 - Classificação de um permutador de calor quanto ao tipo de fluxo. 22
Tabela 4 - Caracterização do edifício. 24
Tabela 5 - Dados Climáticos do edifício 26
Tabela 6 - Levantamento das áreas da envolvente. 27
Tabela 7 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, $Uref$ [W/$m2$°C] de acordo com a zona climática em Portugal Continental 28
Tabela 8 - Coeficientes de transmissão térmica dos elementos construtivos do edifício. 28
Tabela 9 - Quadro I.3: Resistência Térmicas Superficiais 29
Tabela 10 - Valor do U da cobertura - Método de Cálculo EN ISO 13786. 29
Tabela 11 - Distribuição dos vãos envidraçados pelo edifício consoante a sua orientação. 30
Tabela 12 - Fatores solares máximos admissíveis dos vãos envidraçados para a classe de inércia média 30
Tabela 13 - Condições exteriores no local. 32
Tabela 14 - Densidade adotada para cada tipologia. 32
Tabela 15 - Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida à ocupação, [m3 /(hora.pessoa)] 33
Tabela 16 - Caudais mínimos de ar novo para cada tipologia. 33
Tabela 17 - Unidades de Tratamento de Ar Novo e suas características. 34
Tabela 18 - Características da Unidade Desumidificadora da Piscina (UDP). 35
Tabela 19 - Levantamento dos equipamentos consumidores de AQS no edifício. 36
Tabela 20 - Consumo de AQS do edifício [L/h]. 36
Tabela 21 – Geometria da Piscina 41
Tabela 22 - Condições de projeto do espaço piscina. 41
Tabela 23 - Fatores de utilização em função do tipo de atividade. 41
Tabela 24 - Contabilização das perdas da piscina do complexo Termal Fonte Santa 42
Tabela 25 - Simulação dos sistemas de climatização (UTV + UTA + UDP) do complexo termal. 43
Tabela 26 - Simulação dos sistemas de climatização (VAN's) do complexo termal. 43
Tabela 27 - Tarifário Elétrico EDP 46
Tabela 28 - Limites dos coeficientes NMBE e CVRSME e valores obtidos da simulação. 50
Tabela 29 - Desagregação dos consumos energéticos anuais por utilização final. 51
Tabela 30 - Fatores de conversão das emissões de $CO2$ 52
Tabela 31 - Emissões de dióxido de carbono em 2017. 52

Tabela 32 - Cálculo do $IEEef$. 53

Tabela 33 - Características da ocorrência geotérmica em Almeida 54

Tabela 34 – Emissões (por ano) de dióxido de carbono relativas à solução A. 59

Tabela 35 – Consumos totais e respetivos custos da solução existente e solução A. 60

Tabela 36 - Custos envolvidos e retorno de investimento da solução A relativamente à solução existente 60

Tabela 37 – Emissões (por ano) de dióxido de carbono relativas à solução B. 66

Tabela 38 - Consumos totais e respetivos custos da solução existente e solução B 66

Tabela 39 - Custos envolvidos e retorno de investimento da solução B relativamente à solução existente 67

Tabela 40 - Informação dos consumos do sistema fotovoltaico 69

Tabela 41 - Emissões de dióxido de carbono da solução B + C. 71

Tabela 42 - Consumos totais e respetivos custos da solução existente e solução B + C. 72

Tabela 43 - Custos envolvidos e retorno de investimento da solução B relativamente à solução existente 72

Tabela 44 - Consumos totais e respetivos custos de cada solução implementada. 74

Tabela 45 - Valores de $RIEE$ por classe energética 75

Tabela 46 - Cálculo do índice de eficiência energética para cada solução 76

Tabela 47 - Cálculo do $RIEE$ 76

Tabela C.1 - Requisitos das classes de inércia térmica interior de um edifício. 86

Tabela E.1 - Levantamento dimensional do edifício compartimentos e respetivas zonas de climatização 90

Tabela F.1 - Ventiloconvectores existentes no edifício e respetivas características. 91

Tabela F.2 - Ventiladores de ar novo (VAN) existentes no edifício e respetivas características. 91

Tabela G.1 - Perfil de águas quentes sanitárias (AQS) do edifício: dia da semana (à esquerda) e sábado (à direita). 92

Tabela G.2 - Consumo AQS do edifício. 92

Tabela I.1 - Fatura da energia: energia elétrica relativa ao ano 2017 (fornecida na memória descritiva e justificativa do projeto) 94

Tabela I.2 - Fatura de energia: gás natural relativa ao ano 2017 (fornecida na memória descritiva e justificativa do projeto) 95

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto

O edifício termal Fonte Santa que serve como caso de estudo para a realização da presente dissertação, localiza-se no concelho de Almeida, que integra o distrito da Guarda, na região Centro de Portugal. Este é um estabelecimento que desenvolve, sobretudo, tratamentos termais para doenças do aparelho respiratório e doenças reumáticas. O edifício utiliza já o recurso geotérmico presente no local para a realização dos tratamentos termais. Este projeto visa o reaproveitamento desse recurso, recorrendo a bombas de calor geotérmicas, de modo a suprimir as necessidades térmicas do edifício provenientes de combustíveis fosseis.

Uma bomba de calor geotérmica faz o aproveitamento do calor armazenado no subsolo ou em águas freáticas para climatização e produção de águas quentes sanitárias. Esta tecnologia produz menos agentes contaminantes e utiliza um baixo consumo de eletricidade convencional para um elevado rendimento.

Para otimizar o sistema no edifício é essencial realizar a sua simulação dinâmica, com recurso ao *software* de simulação dinâmica detalhada *TRACE 700*, creditado pela norma *ASHRAE 140*. Este *software* possibilita a simulação detalhada e aproximada do modelo real, de modo a determinar o comportamento energético do edifício. Foi necessário, para tal, desenvolver competências na área de modelação e simulação térmica de edifícios. É cada vez mais importante o papel da simulação dinâmica neste setor, devido à crescente preocupação energética.

1.2 Motivação

A gestão dos recursos de energia é atualmente um dos maiores desafios que a sociedade enfrenta, à escala mundial. O desenvolvimento económico vigente nas últimas décadas, assinalou a crescente dependência dos combustíveis fósseis. A natureza finita destes recursos naturais, bem como o seu impacto ambiental negativo, promove a procura de novas soluções, principalmente ao nível das energias renováveis e o aumento da eficiência energética, com o objetivo de viabilizar um desenvolvimento sustentável [1].

Segundo a diretiva europeia nº 2010/31/EU, os edifícios representam 40% do consumo energético total da União Europeia. Uma vez que o setor se encontra em contínuo crescimento, é expectável um aumento deste consumo ao longo dos anos. Consequentemente, a sua redução e a utilização de

energia proveniente de fontes renováveis constituem medidas importantes e necessárias para reduzir a dependência energética da UE e as emissões de gases com efeito de estufa [2].

Por outro lado, a evolução tecnológica e o crescente poder económico nos últimos anos, aliado às maiores exigências de conforto térmico, aumentou significativamente a viabilidade económica dos sistemas energéticos de pequena escala. Tudo isto contribui para que exista cada vez mais uma maior sensibilização neste campo. A Diretiva 2009/28/CE visa a implementação de fontes de energia limpas, impondo metas nacionais que garantem o cumprimento das parcelas definidas para o consumo energético na comunidade europeia até 2020 [3].

A geotermia, quando comparada com outras fontes de energia, apresenta menos impactos ambientais negativos e oferece maior segurança. A sua elevada disponibilidade e potencial, juntamente com o facto de ser uma tecnologia de baixo carbono, poderá contribuir fortemente para a diminuição das alterações climáticas e para o aumento da segurança do abastecimento energético. Na Figura 1 apresenta-se a contribuição do impacto da geotermia nas emissões de CO_2, relativamente a outras fontes convencionais de energia.

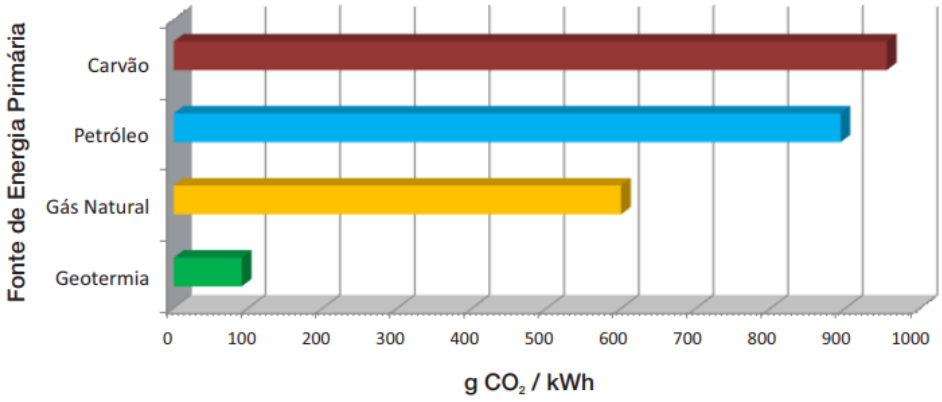


Figura 1 - Contribuição do impacto da geotermia nas emissões de CO_2 (Fonte: Fridleifsson, I.B., et al. 2008) [1].

Portugal apresenta uma elevada dependência energética ao exterior no que diz respeito aos combustíveis fósseis. Por outro lado, encontra-se favorecido no campo das energias renováveis, detendo 39,7% da produção elétrica proveniente de energias renováveis, registado no ano de 2017, como se pode constatar pela Figura 2 [4].

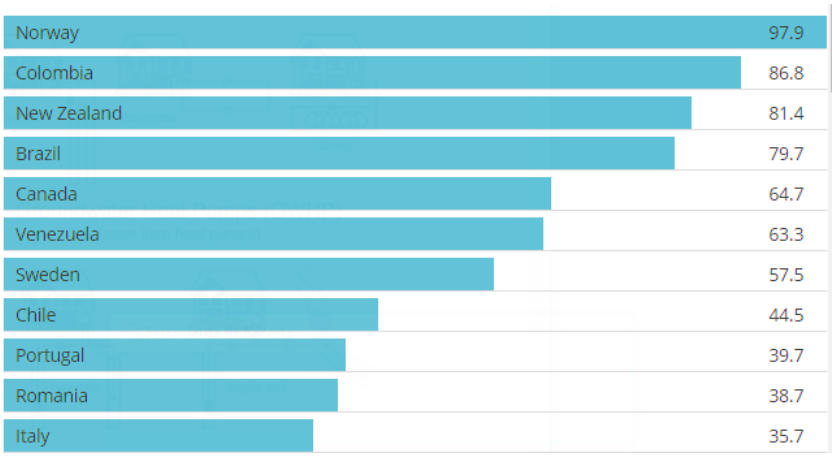


Figura 2 - Posicionamento de Portugal no campo das energias renováveis (2017) [4].

1.3 Objetivos do projeto

O presente projeto contempla vários objetivos, sendo que o principal se centra no tratamento e análise dos dados recolhidos para posterior modelação dinâmica do edifício, e na análise da viabilidade da integração no sistema de uma bomba de calor geotérmica. Com vista à concretização do objetivo que este trabalho se propõe foi necessário criar um modelo representativo das condições de utilização do edifício recorrendo a ferramentas de cálculo de simulação energética dinâmica aplicada a edifícios, neste caso o *software TRACE 700*, de modo a determinar o seu comportamento energético. As diversas simulações realizadas permitiram obter as respetivas necessidades térmicas, em aquecimento e arrefecimento, aproximando este comportamento o mais possível do modelo real.

É também fundamental compreender o potencial do recurso geotérmico de baixa entalpia existente no local, para ser possível tirar o maior proveito deste recurso e maximizar a eficiência energética do edifício. Nesse sentido, a otimização energética passa por selecionar as soluções, exequíveis para o edifício em estudo, que representem reduções no consumo energético do edifício, e que se traduzam, ainda, numa redução efetiva das emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera. Pretende-se também implementar um sistema fotovoltaico, realizando o seu projeto e dimensionamento.

Após avaliação das medidas, é importante a sua comparação em termos energéticos e económicos e o peso de cada uma na redução dos consumos globais do sistema já existente. Constitui também objetivo deste relatório, realizar um enquadramento regulamentar em termos de classificação energética de todas as soluções avaliadas, através da aplicação da metodologia de cálculo do índice de eficiência energético, definida regulamentarmente.

No final, serão comparadas as várias tecnologias simuladas, em termos energéticos e económicos. O estudo de viabilidade deve, para além de avaliar as tecnologias mais favoráveis, avaliar também as necessidades de investimento que cada uma requer.

1.4 Estrutura da dissertação

De modo a alcançar os objetivos referidos anteriormente, foi possível descrever o trabalho desenvolvido em 7 capítulos. Nesse sentido, de forma a permitir ao leitor uma linha contínua de pensamento e facilitar a sua compreensão, decidiu adotar-se a seguinte estrutura.

O presente capítulo consiste numa pequena introdução, na qual se inclui o enquadramento geral do trabalho, assim como a sua relevância e motivação para o autor, os principais objetivos e, por fim, a estrutura em que se desenvolve a dissertação.

O capítulo dois contém toda a teoria fundamental necessária para a realização e compreensão de todo o trabalho realizado. Serve para efetuar uma breve revisão bibliográfica dos assuntos a serem abordados ao longo do projeto. É feita uma breve introdução à energia geotérmica, a sua situação atual em Portugal e o seu enquadramento regulamentar, bem como o funcionamento de uma bomba de calor geotérmica e de um permutador. Para além disto, descreve-se o *software* de simulação dinâmica, crucial para a realização deste trabalho, o *TRACE 700*.

O capítulo 3 diz respeito ao caso de estudo, em que são expostos todos os dados necessários à simulação do edifício e em que se realiza todo o levantamento dimensional e dos elementos

necessários à sua caracterização. Enunciam-se os dados providenciados pelas respetivas entidades, como plantas de arquitetura e de climatização, bem como os dados que foram baseados em normas e diretivas, na falta de informação.

O capítulo 4 expõe o trabalho de simulação dinâmica, o objetivo primordial deste projeto, e apresentam-se os parâmetros considerados, bem como os respetivos resultados das cargas térmicas do edifício, comparando-se assim com o modelo real, de modo a obter o menor erro de calibração possível. Aqui é descrita toda a metodologia usada, e todos os cálculos efetuados para validação da simulação. É também realizada uma análise energética, com o objetivo de perceber os maiores consumos energéticos do edifício.

No capítulo 5 são enunciadas as 3 medidas de racionalização de energia, bem como os resultados obtidos, acompanhados de uma análise energética e económica feita em relação à solução já existente. É ainda calculada a classificação energética do edifício com base no índice de eficiência energética, de modo a avaliar o enquadramento regulamentar de cada solução.

No capítulo 6, apresentam-se as principais conclusões do trabalho efetuado, e no capítulo 7 apontam-se algumas perspetivas de desenvolvimento de trabalhos futuros.

Como forma de complemento ao conteúdo desta dissertação são ainda expostos, no final do relatório, alguns anexos considerados pertinentes.

2 Estado de Arte

Nesta seção, são abordados os temas principais necessários para a compreensão de todo o projeto, assim como evidenciadas as referências que foram usadas ao longo do mesmo. Torna-se um capítulo de especial importância pois é a base de todo o trabalho realizado, permitindo encaminhar o estudo e perceber o modo como os assuntos foram abordados e analisados.

2.1 Energia Geotérmica

A geotermia é definida como a "energia armazenada na forma de calor abaixo da superfície da Terra", segundo a definição oficial na Alemanha na Guia VDI 4640 adotada pelo Conselho Europeu da Energia Geotérmica [5].

Este fluxo de calor que surge à superfície é originado pelo calor primordial da formação da Terra, há cerca de 4,5 mil milhões de anos, conjuntamente com o calor que se gera em consequência de diversos fenómenos térmicos que se produzem no interior da Terra, particularmente o calor libertado pela cristalização do núcleo interno, os movimentos diferenciais entre as diferentes camadas que constituem a Terra (Figura 3), e ainda como resultado da desintegração de isótopos radioativos presentes nas rochas que constituem a crosta e o manto. Estas são as principais fontes de calor que mantém a Terra quente a profundidades superiores aos 20 metros. A radiação solar e a chuva, por sua vez, são fatores de origem externa, que consistem praticamente nas únicas fontes de calor significativas até aos 15 metros de profundidade [1].

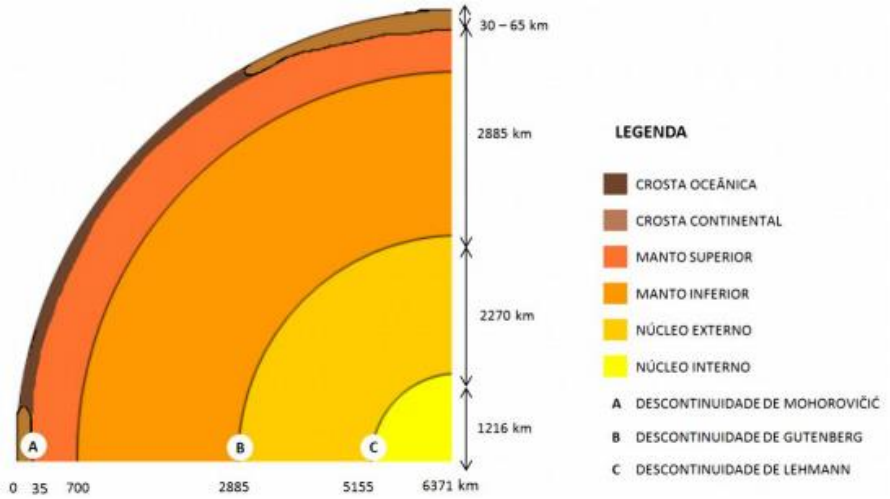


Figura 3 - Estrutura interna da Terra [1].

Verifica-se um aumento da temperatura em profundidade, em termos médios, de 33 graus por quilómetro a partir dos 15 a 30 metros, sendo este valor aproximadamente constante na maior parte da crosta terrestre, a camada mais externa da Terra. Esta variação da temperatura em função da profundidade é designada por gradiente geotérmico (expressa-se em °C/Km), e pode assumir valores irregulares, devido à heterogeneidade da crosta terrestre, em que podem surgir zonas anómalas, isto é, zonas onde a variação da temperatura com a profundidade é inferior ou superior ao valor esperado. Há zonas de intrusões magmáticas, áreas de atividade sísmica ou vulcânica, onde a temperatura próxima da superfície terrestre, se apresenta bastante mais elevada. São zonas de elevado gradiente, que interessam prioritariamente à geotermia, sendo possível o seu aproveitamento para a produção de energia elétrica.

Uma forte vantagem deste tipo de energia, que a destaca das outras, é a sua independência relativamente às condições externas, nomeadamente a radiação solar, o vento ou as marés, o que faz com que esta seja encarada como uma forma de energia contínua que se pressupõe disponível 24 horas por dia e inesgotável [6].

Também o facto desta energia representar uma energia local, ecológica e eficiente que permite atingir maiores níveis de sustentabilidade energética e ambiental, reduzindo a emissão de gases para a atmosfera e reduzir custos económicos, torna-a atrativa à escala global nas suas várias formas de exploração, a nível de usos diretos, geotermia superficial e estimulada. Além disso pode também funcionar paralelamente com outros sistemas, como o solar, constituindo por isso um fator de incremento da competitividade industrial e com efeitos positivos a médio e longo prazo no desenvolvimento da economia e na criação de emprego.

Este tipo de tecnologia demonstra ser muito eficiente, sendo um dos seus maiores problemas o investimento inicial, uma vez que os sistemas convencionais são menos dispendiosos. No entanto, para compensar, o período de "*payback"* está entre os 3 e os 10 anos, dependendo da instalação [7].

Outra desvantagem, consiste no facto de apenas uma pequena porção desta energia poder ser utilizada pelo Homem, estando limitada a zonas nas quais as condições geológicas permitem a circulação de água na fase líquida ou de vapor, que transporta o calor até zonas mais superficiais, dando origem aos reservatórios geotérmicos [1].

Também a ausência de legislação adaptada à nova realidade da geotermia de muito baixa entalpia se torna uma desvantagem, paralelamente à escassez de empresas com competências técnicas para a realização deste tipo de projetos.

O recurso geotérmico constitui a porção de energia geotérmica acumulada num reservatório e que pode ser aproveitada de forma técnica e economicamente viável. Este pode ser dividido em 4 categorias, de acordo com a sua temperatura e potencial de aproveitamento:

- Alta entalpia – quando a temperatura é superior a 180 °C;
- Média entalpia – quando a temperatura se situa entre os 90 °C e os 180 °C;
- Baixa entalpia – correspondente a temperaturas entre 30 °C e 90 °C;
- Muito baixa entalpia – para temperaturas inferiores a 30 °C.

Neste caso já não se fala em reservatório por ser normal em toda a crosta terrestre, no entanto, ainda é possível o aproveitamento deste recurso, geralmente recorrendo a bombas de calor geotérmicas.

O recurso pode também ser classificado recorrendo à profundidade. Assim, tem-se:

- Geotermia superficial – quando em situações de profundidade inferiores a 250 metros, cujo aproveitamento, mediante a utilização de bombas de calor geotérmicas, permite a climatização direta de espaços e aquecimento de águas quentes sanitárias;
- Geotermia profunda – para profundidades superiores a 400 metros, cujo aproveitamento permite, por exemplo, produção de eletricidade.

Em Portugal continental apenas existe energia geotérmica de baixa entalpia, existindo já algumas aplicações diretas na climatização de edifícios e no aquecimento de piscinas e estufas. Por outro lado, no arquipélago dos Açores entra-se no domínio das "altas entalpias" e a situação é completamente diferente, verificando-se um maior potencial geotérmico, o que possibilita um grande aproveitamento desta energia para produção de eletricidade [8].

A Figura 4 corresponde ao Diagrama de *Lindal*, que apresenta, esquematicamente, as principais aplicações da energia geotérmica em função da temperatura. Segundo *Lindal*, os recursos geotérmicos podem ter diversas aplicações a diferentes níveis entálpicos. A utilização de bombas de calor geotérmicas (BCG), surge apenas para as gamas de temperaturas abaixo dos 40 °C, que corresponde à energia geotérmica de baixa ou muito baixa entalpia [9, 10].

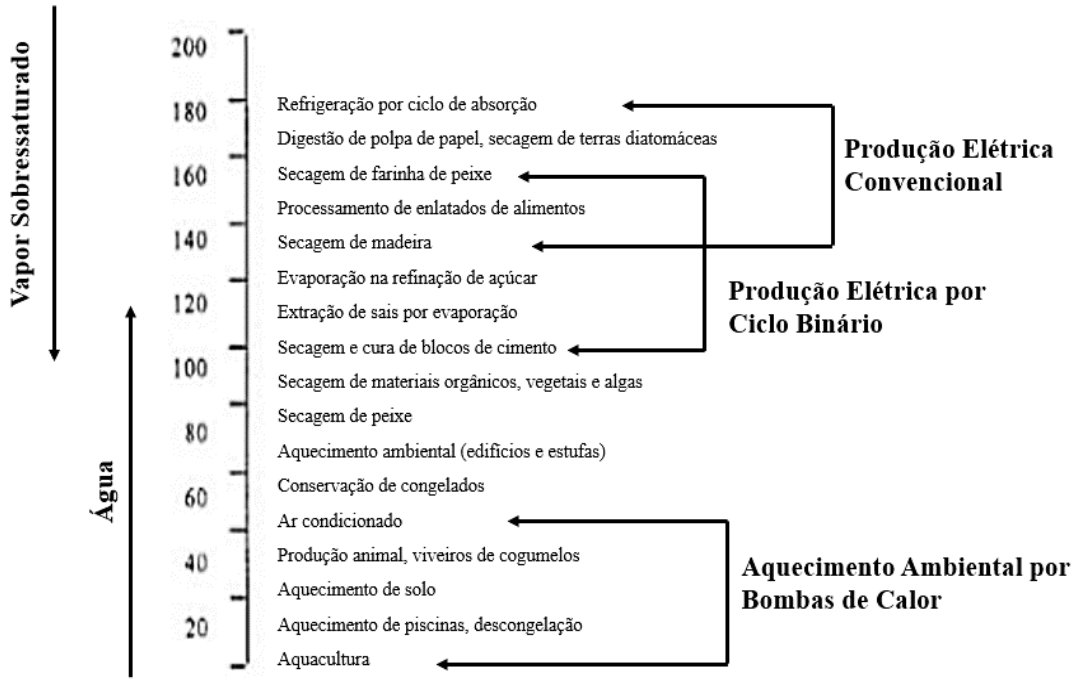


Figura 4 - Diagrama de *Lindal*: Utilizações da energia geotérmica (Adaptado de *LINDAL*, 1973) [10].

Mesmo no que diz respeito à energia geotérmica de muito baixa entalpia, constata-se que o subsolo se apresenta como uma fonte de energia térmica bastante estável, mesmo a baixas profundidades, sendo passível de aproveitamento para fins de conforto térmico do ser humano.

Segundo a alínea e) do Artº 29º da Lei nº 54/2015, de 22 de junho, constitui obrigação dos concessionários aproveitar os recursos da melhor forma, sendo este aproveitamento regido por normas técnicas adequadas e em harmonia com o interesse público. Deste modo, considera-se que os recursos hidrominerais, cuja temperatura seja superior a 20 °C, são suscetíveis de serem aproveitados na sua componente geotérmica [1, 11].

2.2 Sistemas Geotérmicos Estimulados

Em determinadas situações, onde o gradiente geotérmico se apresenta relativamente baixo, quando comparado com as regiões de vulcanismo ativo, as profundidades necessárias para a exploração do recurso, que vão aproximadamente dos 3 aos 5 km, implicam que os reservatórios tenham de ser estimulados para aumentar a sua permeabilidade e assim incrementar o seu caudal de produção. Esta estimulação dos reservatórios deve ser bem controlada e monitorizada para evitar sismos e a contaminação de aquíferos pelos agentes químicos. Normalmente, é desenvolvida uma rede de fracturação induzida estabelecida pela injeção de água a alta pressão (hidrofraturação) e utilizados agentes químicos para a dissolução seletiva de fases minerais. Este princípio, usado nos sistemas geotérmicos estimulados (*Enhanced Geothermal Systems – EGS*), surge representado esquematicamente na Figura 5 [12].

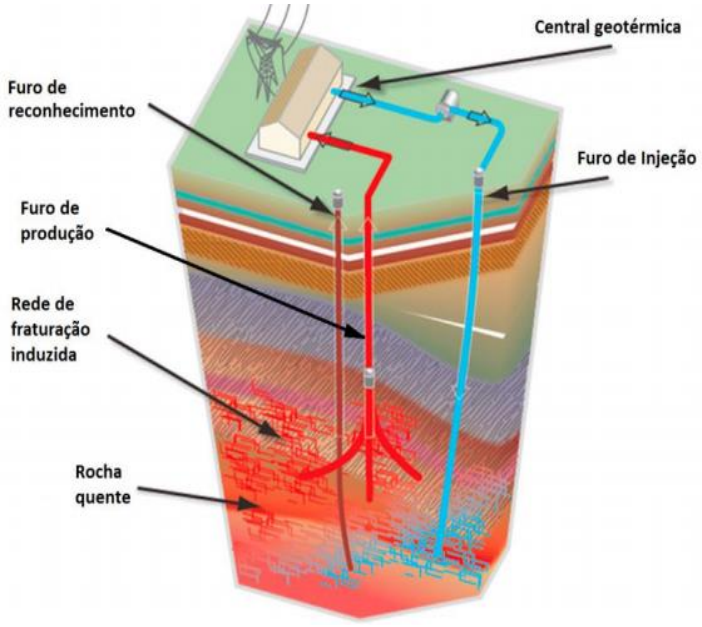


Figura 5 – Sistema Geotérmico Estimulado e sua exploração (Adaptado de *Department of Energy*, 2008) [1].

Uma vez melhorada a permeabilidade do reservatório, de forma a garantir caudais significativos, o calor das rochas é extraído através da circulação de água. Para estabelecer esta circulação, para além do furo de injeção, faz-se um furo de produção para extração de água quente profunda (salmoura). De modo a garantir a pressão do reservatório, para suster o caudal, a salmoura é de novo reinjetada em profundidade. No entanto, antes da reinjeção, procede-se à transferência de calor num permutador.

O desenvolvimento dos sistemas geotérmicos estimulados poderá vir a ser uma grande contribuição para a progressiva expansão da exploração do recurso, onde o gradiente geotérmico se apresente muito baixo. A adequada seleção de locais é necessária para minimizar os custos de investimento relativamente altos, sendo fundamental, para tal, conhecer a distribuição de calor em profundidade. É ainda necessário que se verifique uma gradual diminuição dos custos das sondagens e do desenvolvimento das técnicas de estimulação de reservatórios, para que haja uma maior disseminação desta tecnologia.

2.3 Geotermia em Portugal Continental

Desde os tempos pré-históricos que a energia proveniente do interior da Terra é aproveitada pelo Homem. Em Portugal continental, existem registos históricos da utilização da água quente natural para balneoterapia, desde o tempo da colonização romana, expressos através de alguns vestígios arqueológicos. Com o desenvolvimento da tecnologia, existem atualmente muitas aplicações práticas no país, de onde se destacam os usos diretos em balneoterapia e climatização de edifícios, existindo apenas condições para aproveitamento de baixa entalpia.

Em Portugal continental, os gradientes geotérmicos registam-se acentuadamente mais baixos do que no Arquipélago dos Açores, não existindo até ao momento centrais geotérmicas para produção de eletricidade. Tal poderá eventualmente vir a ser possível através dos sistemas geotérmicos estimulados, enunciados no subcapítulo anterior [8, 12].

O território de Portugal Continental situa-se numa zona em que a atividade tectónica é relativamente baixa ou nula, uma vez que se encontra no bordo ocidental da placa continental euroasiática, uma placa divergente passiva. Não é expectável a existência de reservatórios geotérmicos de alta entalpia. No entanto, o país detém, em função da sua complexa e diversificada geologia, um apreciável potencial geotérmico. Registam-se ocorrências geotérmicas de baixa entalpia, com temperaturas entre os 30 e os 76 °C, e de muito baixa entalpia, com temperaturas entre os 20 °C e os 29 °C. Além das ocorrências geotérmicas assinaladas no mapa da Figura 6, existem ainda numerosas nascentes e furos de captação que não são classificados como recursos geológicos, mas cujo potencial é suscetível de ser usado com fins de aproveitamento de geotermia superficial [1].

O potencial geotérmico presente em Portugal Continental, pode ser aproveitado por duas vias, as quais a seguir se referem:

- Aproveitamento dos polos termais existentes, os quais apresentam uma gama de temperaturas entre os 20 °C e os 76 °C;
- Aproveitamento do calor proveniente de aquíferos ou formações geológicas com recurso a bombas de calor, permitindo utilizações para climatização.

Os recursos geotérmicos de Portugal Continental encontram-se desigualmente distribuídos em todo o território, predominando na zona norte e centro do maciço hespérico, designadamente na zona centro-ibérica, facilmente observado na Figura 6. A sua distribuição é essencialmente relacionada com aspetos tectónicos, que favorecem uma rápida circulação ascendente dos fluidos onde, em certos locais, se fazem sobressair os valores de gradiente geotérmico, como por exemplo, a falha Penacova-Régua-Verin [8].

Nos últimos anos assistiu-se a grandes progressos, traduzidos quer na concretização do aproveitamento do potencial dos vários polos geotérmicos, quer no recurso à "nova geotermia", ou seja, às bombas de calor e geotermia estimulada (EGS). Tem-se vindo a observar um interesse crescente na realização de projetos que visam o aproveitamento geotérmico, para usos diretos, nomeadamente para o aquecimento dos próprios estabelecimentos termais, piscina e unidades hoteleiras. Em 1982 surgiu o primeiro projeto de uso de calor para fins que não a balneoterapia, em Chaves. O furo, com 155 metros de profundidade e temperaturas a rondar os 75 °C, passou a ser usado com o objetivo de aquecer a água da piscina municipal, através de um permutador de calor. Mais tarde, a água proveniente dos permutadores de calor passou também a ser utilizada para o aquecimento ambiental do hotel, localizado perto das termas [12].

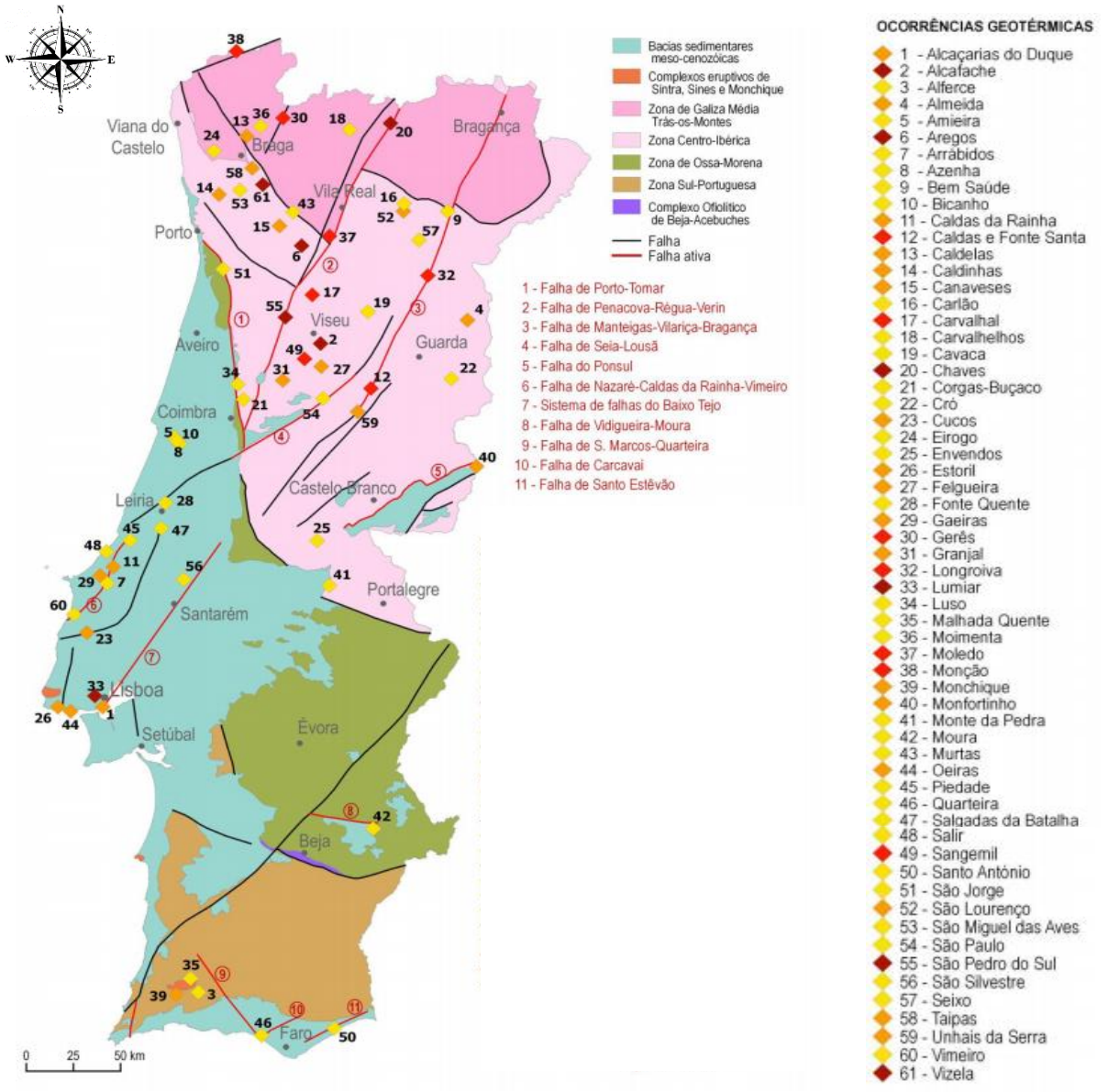


Figura 6 - Ocorrências geotérmicas em Portugal Continental e o seu enquadramento tecno-estratigráfico [1].

Atualmente, das 61 ocorrências geotérmicas existentes em Portugal Continental, 45 estão qualificadas como águas minerais naturais das quais, apenas 7 (Banho de Alcafache, Termas de Carvalhal, Caldas de Chaves, Longroiva, Caldas de Monção, S. Pedro do Sul e Caldas de Vizela) têm uma dupla classificação como água mineral natural e recurso geotérmico. Em 6 delas já é feito o aproveitamento energético em aquecimento direto, ou com recurso a permutadores de calor. O mais recente aproveitamento tomou lugar em Caldas de Monção e teve início em março de 2015 [8, 13].

Em relação à geotermia estimulada, apesar de cada área ter as suas especificidades geológicas-estruturais, sendo necessário selecionar métodos de prospeção adequados a cada lugar, o conhecimento existente sugere que Portugal possui recursos passíveis de poderem vir a ser explorados. Entre os fatores favoráveis destacam-se a existência de granitos radiogénicos com elevada capacidade de geração de calor, a existência de espessas bacias sedimentares com aquíferos quentes, assim como a ocorrência de falhas profundas que facilitam a ascensão dos fluidos profundos.

2.4 Geotermia no Arquipélago dos Açores

A geotermia ligada às altas temperaturas em Portugal é limitada às ilhas vulcânicas dos Açores, e tem sido usada para produção de eletricidade desde 1980. O Arquipélago dos Açores é formado por 9 ilhas oceânicas vulcânicas, localizadas na Crista Médio Atlântica, na confluência de 3 placas tectónicas: Americana, Euroasiática e Africana. A sua localização e enquadramento geotectónico traduzem-se numa atividade sísmica e vulcânica significativas, apresentando manifestações de vulcanismo secundário como os campos fumarólicos e as nascentes minerais, que indicam grandes quantidades de energia existentes no subsolo [14].

No total estão registadas nos Açores, 48 ocorrências geotérmicas superficiais de baixa entalpia (com temperaturas entre 22 °C e 98 °C), sendo que 25 delas se situam na ilha de S. Miguel [1].

2.4.1. Aproveitamentos Geotérmicos em São Miguel

A prospeção geotérmica, iniciada na segunda metade da década dos anos 70, na vertente norte do Vulcão do Fogo culminou em 1980 com a construção da central geotérmica piloto de Pico Vermelho (CGPV), que apresentava uma instalação com uma potência nominal de 3 MW. Esta central foi instalada como um projeto piloto de confirmação do potencial geotérmico da zona, e pode ser vista na Figura 7.



Figura 7 – Central Geotérmica Piloto do Pico Vermelho (3 MW) [14].



Figura 8 – Central Geotérmica Piloto do Pico Vermelho 2007 (10 MW) [14].

A central foi desativada em 2005, em consequência de estudos realizados que consideraram o grupo gerador obsoleto e aconselharam a sua substituição. Neste pressuposto, foi configurado o projeto de remodelação da CGPV, que conduziu à construção e montagem de um grupo gerador com uma potência de 10 MW. A nova central, representada na Figura 8, é constituída por cinco poços de produção, cuja profundidade é de cerca de 1000 m e a temperatura máxima medida foi de 243 °C.

Por outro lado, a central geotérmica da Ribeira Grande (CGRB) possui uma capacidade de geração de 13 MW, instalada em 2 fases: em 1994, a Fase A constituída por dois grupos turbogeradores duplos (2 x 2,5 MW); a Fase B, em 1998, em que foi instalada uma potência adicional com mais dois grupos turbogeradores (2 x 4 MW). A central revela uma elevada estabilidade e continuidade do recurso. Em relação à produção anual, verifica-se um decréscimo que se relaciona com o declínio natural dos poços geotérmicos face à sua exploração. No entanto, esta situação pode ser contornada pela construção de poços de produção adicionais, cuja execução não se consegue fazer ao ritmo necessário para compensar este declínio, tendo em conta as dificuldades na orografia da área afeta à central.

Destas 2 centrais, cuja produção (em GWh) ao longo dos últimos anos se apresenta na Figura 9, a que apresenta maior produção anual de energia é a CGPV. A produção combinada das duas centrais em 2018 atingiu o valor de 183,5 GWh, o que contribui na estrutura de produção da Ilha de S. Miguel com uma quota de 42% [14].

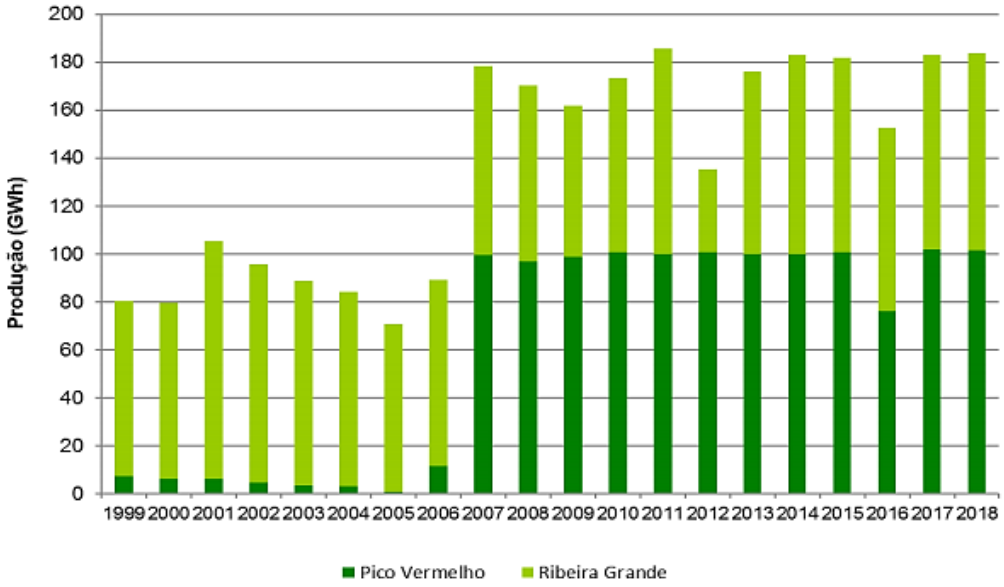


Figura 9 - Evolução da exploração da Central Geotérmica da Ribeira Grande e do Pico Vermelho [14].

2.4.2. Aproveitamentos Geotérmicas na Ilha Terceira

Em 2017 foram terminados os trabalhos de construção da Central Geotérmica Piloto do Pico Alto (Figura 10), com uma potência instalada de 3,5MW. Este foi o primeiro aproveitamento geotérmico, para produção de eletricidade, na ilha Terceira e permitiu avaliar o comportamento produtivo a longo prazo do reservatório e poços geotérmicos, através da monitorização de variados parâmetros. Em 2018 a Central Geotérmica do Pico Alto contribui na estrutura de produção da Ilha Terceira com 10,7% [14].



Figura 10 - Central geotérmica Piloto do Pico Alto [14].

2.5 Enquadramento legal do aproveitamento geotérmico

A crise energética que se desenrolou no início dos anos setenta, levou Portugal a procurar novas fontes de energia para satisfazer as necessidades energéticas. Esta crise, aliada especialmente ao interesse de o arquipélago dos Açores proceder ao aproveitamento geotérmico dos recursos existentes, para produção de eletricidade, conduziu à fixação do primeiro diploma legal relativo à geotermia, o Decreto-Lei nº 560-C/76, de 16 de julho, que veio definir o regime a que ficou sujeita a prospeção e exploração dos recursos geotérmicos [12].

Com o aparecimento da possibilidade de um maior aproveitamento dos recursos geotérmicos disponíveis em Portugal Continental foi necessária a fixação de um novo quadro jurídico, o Decreto-Lei n.º 87/90, de 16 de março, que veio a ser integrado no conjunto legislativo alusivo aos recursos geológicos, Decreto-Lei n.º 90/90. Este define, no seu Artº4, os recursos geotérmicos como: "fluidos e formações geológicas do subsolo, de temperatura elevada, cujo calor seja suscetível de aproveitamento". Ainda segundo o mesmo, os recursos geotérmicos integram o domínio público, pelo que a sua exploração apenas pode ser executada mediante contrato administrativo com o Estado [6, 12].

O acesso à atividade de exploração dos recursos geotérmicos encontra-se descrito, de uma forma resumida, na Figura 11.

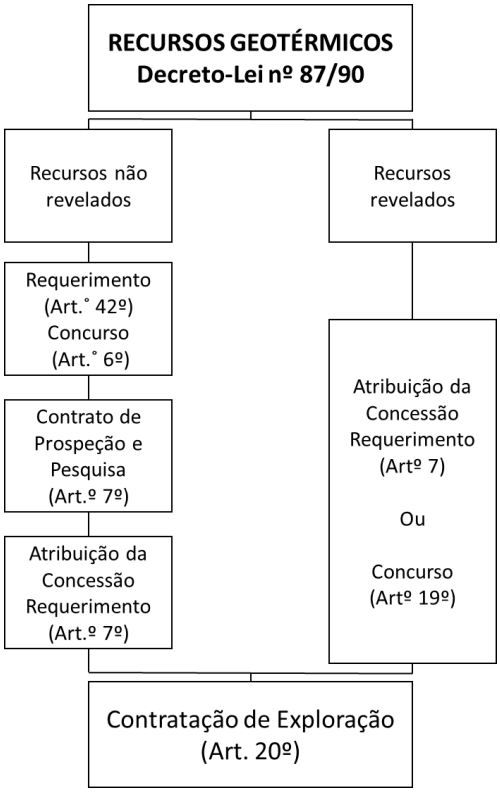


Figura 11 - Acesso à atividade de exploração de recursos geotérmicos (Adaptado de [12]).

Com o avanço da tecnologia relativa ao aproveitamento geotérmico, tornou-se necessário conceber uma legislação adaptada ao novo paradigma da geotermia superficial. Para tal, foi estabelecido um protocolo para a criação de uma base de estudo e análise do aproveitamento geotérmico através de bombas de calor. Foram quatro as entidades nacionais que o estabeleceram, designadamente a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), a Associação Portuguesa de Geólogos (APG) e a Agência para a Energia (ADENE) [6].

Em sequência, a 21 de janeiro de 2013, foi estabelecida a Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial (PPGS), a qual pretende divulgar e fomentar o desenvolvimento ordenado da exploração da geotermia superficial, intervindo nas várias áreas de relevo para o desenvolvimento e implementação da atividade em Portugal, sobretudo a nível de legislação, informação, disseminação, formação e investigação (Figura 12). A 22 de Junho de 2015, foi estabelecida a lei n.º 54 que veio alterar um pouco a definição do recurso geotérmico, a qual já abrangia a geotermia superficial. A nova definição alterou-se para "os fluidos e as formações geológicas do subsolo, cuja temperatura é suscetível de aproveitamento económico" [6].



Figura 12 - Áreas de intervenção da PPGS [6].

2.6 Bombas de Calor

Segundo o enunciado de *Clausius*, é impossível para qualquer sistema que funcione em ciclo, transferir calor de um corpo a uma temperatura inferior para um corpo a temperatura superior, contrariando deste modo a direção natural do fluxo de calor, sem existir outra forma de energia que force essa transferência. Assim, existem equipamentos que usam processos físicos com esse objetivo, como é o caso das bombas de calor. Estas, podem também otimizar a transferência de calor de um espaço quente para um espaço frio.

O seu princípio de funcionamento baseia-se na utilização de uma fonte de calor (água, terra ou ar), de onde é retirada a energia térmica a fornecer ao meio a climatizar. Necessita ainda de dois permutadores de calor, o evaporador e condensador que liberta o calor, e uma quantidade relativamente pequena de energia motriz para manter o sistema a funcionar, sobretudo o compressor.

O sistema de bombas de calor já é conhecido há vários anos, mas registou uma grande evolução na última década, principalmente pelas questões ligadas aos crescentes problemas ambientais e à necessidade de utilizar a energia de uma forma mais racional. O interesse nestes sistemas tem a sua razão uma vez que utilizam menos trabalho para mover o calor entre fontes. Na Figura 13 surgem representados os principais elementos de uma bomba de calor, bem como o seu princípio básico de funcionamento.

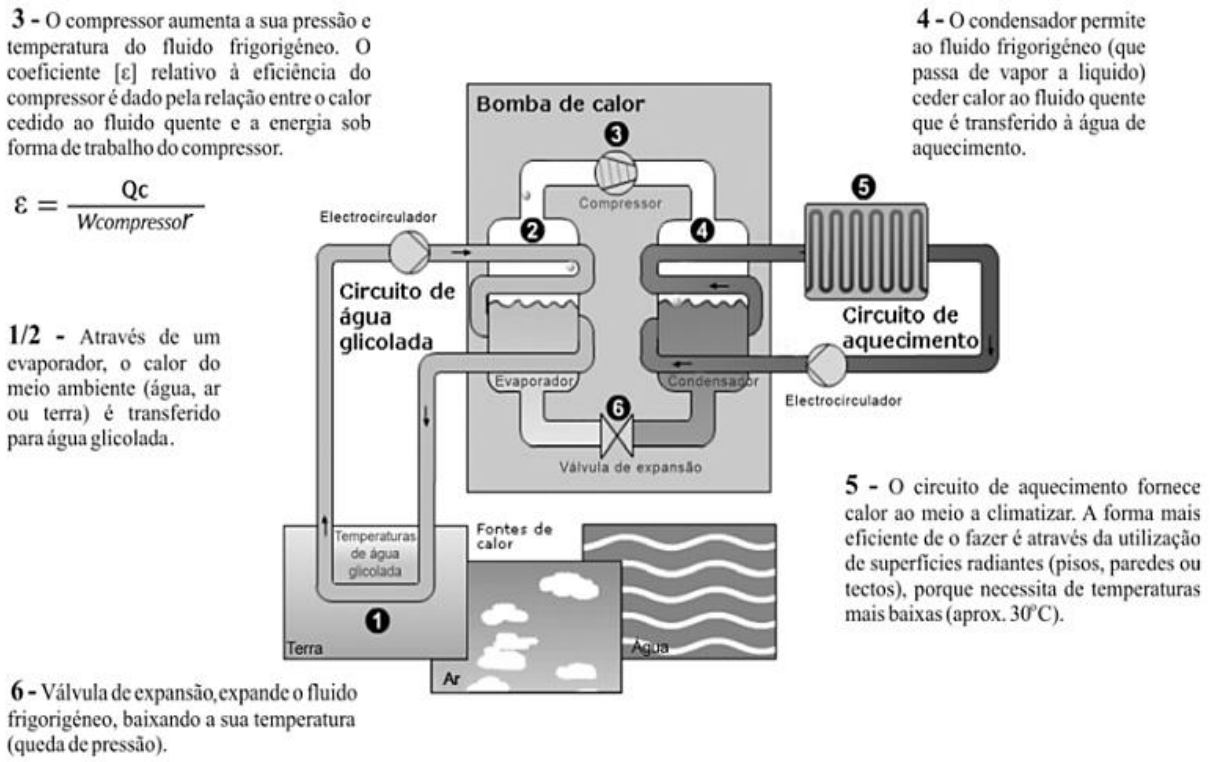


Figura 13 - Princípio básico de uma bomba de calor e os principais constituintes (Adaptado de www.portal-energia.com) [12].

O refrigerante precisa de atingir uma temperatura baixa o suficiente, quando expandido (6), para que o calor possa fluir do ambiente frio para o refrigerante no evaporador, e atinja uma temperatura alta o suficiente, quando comprimido (3), para libertar calor através do condensador. A diferença de pressão deve ser grande o suficiente para que o fluido condense no lado quente e evapore no lado frio. No entanto, quanto maior a diferença de temperatura, maior a diferença de pressão necessária e, consequentemente, maior a energia requerida no compressor, logo, menor a eficiência da bomba de calor.

É através do coeficiente do desempenho do sistema, ou na terminologia inglesa "*coefficient of performance – COP*" que é indicada a eficiência de uma bomba de calor. O *COP* traduz a relação entre a energia térmica fornecida ao local a climatizar, e a energia elétrica consumida e cujos respetivos valores se situam tipicamente entre 2,5 e 6. Isto significa que retirar calor de uma fonte requer 1 kW de potência elétrica, gerando entre 2,5 a 6 kW de potência térmica. O valor máximo deste coeficiente é limitado pelas temperaturas da fonte fria e quente.

O desenvolvimento tecnológico vivenciado ao longo dos anos, apresenta-nos hoje em dia uma oferta no campo de bombas de calor bastante ampla, sendo os tipos mais frequentes [15]:

- Bomba de calor Aerotérmica – apresenta como fonte de calor o ar;
- Bomba de calor Geotérmica – apresenta como fonte de calor o solo;
- Bomba de calor assistida por Energia Solar;
- Bomba de calor a gás.

A unidade mais utilizada é a bomba de calor água-ar. A bomba de calor água-água também é bastante comum e revela-se eficaz, principalmente, quando o circuito de água do edifício não requer temperaturas

muito elevadas. No entanto, caso seja esse o caso, é necessária a associação de uma caldeira à instalação. Esta unidade é ideal para a produção de águas quentes sanitárias [16].

2.6.1. Fluidos de Trabalho Frigorigéneos

O fluido de trabalho de um ciclo termodinâmico, é a substância que recebe e rejeita energia térmica enquanto percorre o ciclo, durante o qual existe a realização de trabalho. São diversos os fluidos frigorigéneos, os quais são classificados de acordo com as suas características termodinâmicas e físicas.

Os fluidos de trabalho mais usados neste campo são o R407C e o R134A, apesar da tendência em serem alterados para o R410A. Este fluido frigorigéneo é uma mistura não azeotrópica 50/50 de dois fluidos, HFC32 e o HFC125, possui propriedades de transferência de calor superiores e um melhor desempenho nos sistemas reversíveis de aquecimento e arrefecimento. Segundo o *ASHRAE Standard 34*, que classifica o grau de perigosidade dos fluidos frigorigéneos, o R410A é classificado de A1, a classe menos perigosa de todas [17].

Tendo em conta que o fluido frigorigéneo selecionado, através das suas propriedades, influencia diretamente quer a estrutura como a eficiência de um determinado equipamento de refrigeração, e consequentemente custos de aquisição e operação, a escolha do mesmo deverá ser realizada com o maior rigor possível para evitar uma solução inconveniente.

2.7 Bombas de Calor Geotérmicas

Numa sociedade que revela uma dependência energética crescente e que continua a utilizar combustíveis fósseis como principal fonte de energia, o recurso a esta tecnologia pode contribuir para a redução desta destes problemas bem como para o aumento da segurança de abastecimento energético [12].

As bombas de calor geotérmicas estão entre os sistemas de energia mais eficientes para aquecimento e arrefecimento disponíveis. Usam menos energia elétrica e produzem menos emissões de CO_2 do que os sistemas convencionais. São uma solução eficiente para fornecer as condições de conforto interior às habitações, dado que aproveitam a energia do meio onde se encontram para produzir calor, quer para climatização, quer para a produção de águas quentes sanitárias (AQS). Estas podem ser combinadas com módulos de aquecimento solar, melhorando os níveis de eficiência. Em relação aos sistemas convencionais, o investimento inicial no equipamento e instalação é superior, no entanto, é rapidamente superado pela maior economia de funcionamento.

Pelo facto de as temperaturas do subsolo serem bastante mais estáveis e moderadas, sobretudo a partir de determinada profundidade, estes sistemas conseguem assim, melhores eficiência que os sistemas convencionais, durante todo o ano. Quando a variação da diferença entre o interior e o exterior é elevada, como pode acontecer com um sistema bomba de calor aerotérmica, é requerido mais trabalho para fornecer o mesmo grau de aquecimento, o que reduz o COP. Caso a diferença seja excessiva, o sistema pode até não funcionar como desejado.

As bombas de calor geotérmicas (BCG) são compostas por 3 sistemas principais [18]:

- Bomba de calor – transporta o calor entre o edifício e o solo, modificando a sua temperatura;

- Ligação ao solo – através de um permutador de calor, o calor é extraído ou entregue no subsolo;
- Sistema de distribuição de calor interno – constitui um sistema localizado no interior do edifício e é através dele que o calor é entregue ou extraído dos espaços.

As bombas de calor geotérmicas são subdivididas pelo tipo de sistema de permutador de calor externo ou geotérmico que possuem. A nomenclatura a seguir apresentada foi adotada pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (*ASHRAE*):

- Bombas de calor acopladas ao solo (BCAS) – usam a terra como fonte de calor, os permutadores são um sistema de tubagem com circuito fechado enterrado no solo e podem ser horizontais ou verticais;
- Bombas de Calor de Água Subterrânea (BCASub) – usam a água subterrânea (aquíferos) como fonte de calor;
- Bombas de Calor de Águas Superficiais (BCASup) – usam as águas superficiais (lagos) como fonte de calor e 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.

Na Figura 14 surgem representados os vários casos de transferência de calor do solo, ou para o solo, que pode ser realizada em sistemas fechados (bombas de calor acopladas ao solo) através de permutadores de calor enterrados (vertical ou horizontalmente) ou através de sistemas abertos (bombas de calor de águas subterrâneas) com a extração de água subterrânea que troca calor com um permutador de calor na superfície.

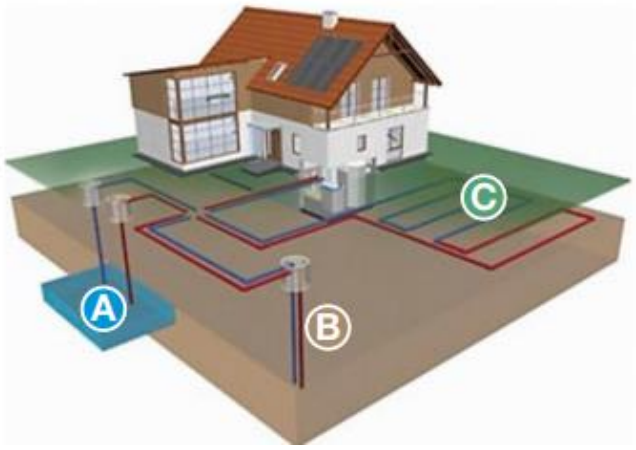


Figura 14 – Representação de sistemas geotérmicos: superficiais abertos (A), fechados verticais (B) e fechados horizontais (C) [1].

A aplicação das BCG abrange maioritariamente edifícios residenciais, no entanto são cada vez mais utilizadas nos sectores comerciais e institucionais. Do ponto de vista económico, as BCG não necessitam de equipamentos de controlo muito elaborados para fornecer conforto e eficiências elevadas. O principal entrave à utilização deste tipo de sistemas é o custo de perfuração do solo, cujos valores médios rondam os 45 € por metro de perfuração, valor que já inclui o custo da sonda geotérmica. [19]

A energia geotérmica captada por bombas de calor geotérmicas é, de acordo, com o Decreto-Lei nº 141/2010, considerada renovável desde que a energia final produzida exceda significativamente a energia primária utilizada para fazer funcionar as bombas de calor.

2.7.1. Bombas de calor acopladas ao solo (BCAS)

São também conhecidas por bombas de calor geotérmicas de circuito fechado, e são os sistemas mais comuns neste tipo de bombas. Os sistemas fechados trocam calor de e para o solo através da diferença de temperatura entre o solo e o fluido de trabalho que circula dentro do permutador de calor enterrado. O fluido que circula nos tubos enterrados encontra-se num ciclo fechado, não tendo contacto direto com o subsolo. São sistemas extremamente seguros, com pouca manutenção. Podemos dividi-los em circuito horizontal e vertical, os quais se apresentam na Figura 15 [18].

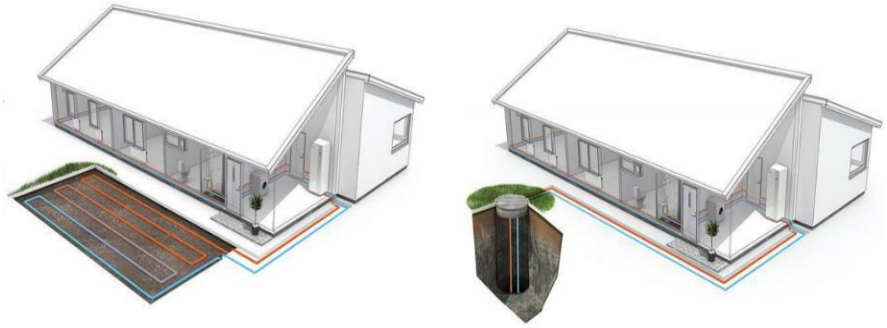


Figura 15 – Bombas de calor acopladas ao solo: sistema horizontal (esquerda) e sistema vertical (direita) [21].

2.7.1.1. Circuito Vertical

Este tipo de circuito consiste numa série de tubos que se posicionam verticalmente no subsolo. Estes inserem-se em furos com uma profundidade de 45 a 75 metros para zonas residenciais ou para lá de 150 metros em aplicações de grande escala. Furos mais profundos não são muito usuais, pois as perdas de carga na tubagem são maiores.

O refrigerante é movido através destes tubos até à bomba e depois da bomba volta a passar pelo circuito, sendo que este nunca sai do sistema. Os tubos formam, normalmente, uma ligação em "U" ou coaxial, na parte inferior, mas podem ter ainda a forma dupla e tripla em U, a forma em W, ou em hélice. Uma vez inseridos os tubos, o espaço vazio entre as paredes do furo e o tubo é preenchido com areia ou misturas de cimento com areia, para melhorar a transferência de calor, impedir infiltrações de água subterrânea e proteger os tubos.

A vantagem destes circuitos consiste em permitir a instalação de um sistema de bomba de calor geotérmica onde exista pouca área disponível, diminuindo por outro lado, o impacto paisagístico. Para além disto, devido às grandes profundidades a que se encontram os tubos, é possível obter temperaturas mais constantes, durante o ano inteiro, aumentando a eficiência. Por outro lado, a grande desvantagem é o custo elevado envolvido nas perfurações de grandes dimensões [18, 20].

2.7.1.2. Circuito Horizontal

Por sua vez, o circuito horizontal consiste numa série de tubos distribuídos horizontalmente numa área considerável, com profundidade a rondar 1 ou 2 metros. Existem diversas configurações que os tubos podem apresentar consoante área disponível e o calor necessário transferir. Dentro destas constam o circuito simples, em série, em paralelo e o circuito em espiral, cuja representação pode ser observada na Figura 16.

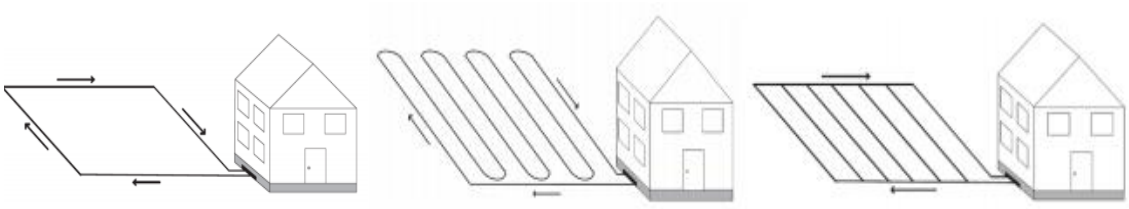


Figura 16 - Bombas de calor geotérmicas de circuito fechado horizontal: Circuito simples (à esquerda), circuito em série e circuito em paralelo (à direita) [18].

No dimensionamento de um circuito horizontal é necessário ter em conta o espaçamento a aplicar entre as tubagens e o regime térmico dos solos no local. O circuito simples, é o que necessita de uma quantidade de tubagem menor, no entanto, requer uma grande área disponível. Já nos circuitos em série e paralelo, a área necessária é mais pequena, no entanto aumenta a tubagem a usar.

Neste tipo de circuito, comparativamente ao circuito vertical, verifica-se uma redução nos custos da instalação, uma vez que a perfuração é muito menos dispendiosa. No entanto, assiste-se a uma diminuição da eficiência comparativamente ao circuito vertical, visto que há uma maior interação do solo com o ambiente neste caso, que resulta em maiores flutuações de temperaturas diárias e anuais [21].

2.7.2. Bombas de Calor de Circuito Aberto

Nestes circuitos, representados na Figura 17, ocorre contacto direto com o solo através das águas superficiais e subterrâneas, como por exemplo, lagos e aquíferos, que funcionam como via direta de transporte de calor. Os furos geotérmicos, geralmente, com profundidades entre os 10 m e os 50 m, servem para a extração e reinjeção da água que circula pela bomba de calor onde é aproveitada a sua energia através da diferença de temperatura, sendo posteriormente devolvida ao subsolo. Como as águas subterrâneas apresentam uma temperatura aproximadamente constante ao longo do ano, acabam por ser uma excelente forma de energia térmica.

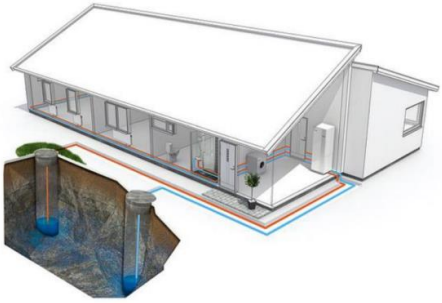


Figura 17 - Bombas de calor geotérmico de circuito aberto [21].

As condições hidrogeológicas condicionam o design de qualquer sistema aberto. Uma vez que os aquíferos podem ter uma capacidade limitada e composição química desfavorável, o seu tipo, geometria, as propriedades hidráulicas e os limites ou contactos geológicos, são informações essenciais para a conceção destes sistemas.

As vantagens destes sistemas consistem no facto de a água apresentar uma temperatura constante, uma vez que não existe ligação à terra (como nos sistemas fechados) apresentando um maior coeficiente de performance aliado aos menores custos iniciais, uma vez que é menor o número de perfurações. Ao invés, requerem uma maior manutenção do permutador de calor na bomba devido à corrosão ou outro qualquer tipo de danos. Também a regulamentação da autorização deste tipo de sistemas, por parte da DGEG e de várias instituições do setor, é bastante exigente. Possuem limitações associadas à quantidade de água que pode ser extraída e aos requisitos de qualidade da mesma, a que é necessário atender, existindo o risco acrescido de alteração das características da água subterrânea, podendo levar a impactos ambientais que poderão ser consideráveis, devendo ser, por isso, avaliados [18].

2.8 Permutadores de Calor

Um permutador de calor consiste num equipamento que promove a transferência de energia térmica entre dois (ou mais) fluidos, a diferentes temperaturas. Este tipo de sistema existe sob as mais diversas designações, como por exemplo, caldeiras, condensadores, vaporizadores, permutador carcaça-tubos, permutadores de placas, entre outros. Para além disso, são usados nas mais diversas aplicações e com várias finalidades, como em sistemas de recuperação de calor, ar condicionado, refrigeração e aquecimento ambiente. Na Tabela 1 apresentam-se algumas das aplicações deste tipo de sistema [22].

Tabela 1 - Aplicações de um permutador.

Setor	Aplicações
Automóvel	Arrefecimento de água e óleo, condensação e evaporação no sistema AC
Alimentar	Refrigeração e pasteurização da cerveja, processos de arrefecimento industriais
Energia	Condensação e evaporação da água
Doméstico	Sistemas de AVAC, frigoríficos

A classificação de permutadores pode realizar-se de diversas formas. Estes podem ser classificados quanto:

i) Ao tipo construtivo:

Tabela 2 - Classificação de um permutador de calor quanto ao tipo construtivo.

Tubulares	Placas	Compactos	Regenerativos
Tubo duplo Carcaça e Tubos Espiral	Planas Rugosas Em espiral	Placas alhetadas Tubos alhetados	Matriz fixa Matriz Rotativa

O mais simples permutador de calor é o de tubo duplo. Consiste em dois tubos concêntricos de diferentes diâmetros, onde um dos fluidos circula no tubo interior e o outro no espaço adjacente ao tubo interior. A seguir, surge representado na Figura 18, as configurações em co-corrente e em contra-corrente, respetivamente da esquerda para a direita. É possível observar que o diferencial de temperatura entre os fluidos é aproximadamente constante em contra-corrente, tornando esta configuração mais eficiente e tirando maior partido da área de transferência do permutador de calor. Esta observação generaliza-se a todos os permutadores que possam assumir fluxo em contra-corrente. É possível ainda observar que no permutador em co-corrente se verifica uma grande eficiência na entrada, mas esta vai reduzindo à medida que os fluidos avançam no mesmo sentido.

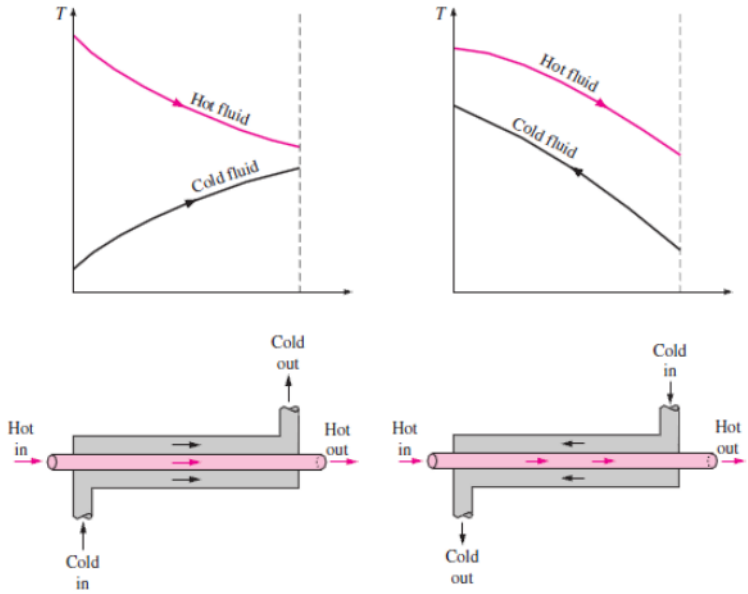


Figura 18 - Permutador de calor tubo duplo, em co-corrente (à esquerda) e em contra-corrente (à direita) [23].

Por sua vez, um permutador de placas, exposto na Figura 19, é formado por espaços definidos por placas sucessivas, onde passa alternadamente, ao longo do seu comprimento, fluido quente e frio. Desta configuração resulta uma grande área de transferência de calor uma vez que ambos os fluidos que passam por entre as placas, trocam energia com duas correntes de fluido em contracorrente pura (uma de cada lado do espaçamento que o fluido atravessa). Por este motivo os permutadores de placas são de alta eficiência, construção simples, fáceis de produzir em série e adaptáveis às necessidades especificadas por cada aplicação. No entanto, o permutador de placas normalmente não suporta pressões muito altas, quando comparado com um permutador tubular equivalente.

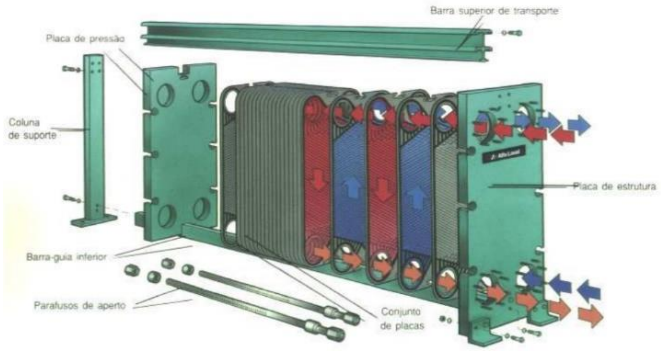


Figura 19 - Permutador de Placas [22].

ii) Ao tipo de fluxo:

Tabela 3 - Classificação de um permutador de calor quanto ao tipo de fluxo.

Passagem Simples	Passagens Múltiplas
Fluxos Paralelos	Cruzado/Paralelo
Fluxos Opostos	Cruzado/co-corrente
Fluxos Cruzados	Dividido
	m passagem carcaça, n passagem tubos

iii) Ao processo de transferência de calor

- Contacto direto: Neste tipo de sistema existe contacto entre os fluidos entre os quais se permuta calor;
- Contacto indireto: Neste tipo de sistema os fluidos encontram-se em contacto com uma superfície sólida que os separa [23].

Num permutador de calor, o fluido com a temperatura mais elevada transfere parte da sua energia, sob forma de calor, para o fluido à temperatura mais baixa. Os mecanismos de transferência de calor associados a esta transferência de energia podem ser, convecção, condução e/ou radiação. Porém, num permutador o mecanismo mais relevante é a convecção. O balanço global da energia num permutador de calor teórico pode ser resumido pelas equações a seguir representadas. Na última equação assume-se que o calor cedido pelo fluido quente é igual ao calor ganho pelo fluido frio. Na prática não é exatamente igual devido a perdas pelo isolamento, à resistência térmica dos materiais e sujidade (*wall fouling*) [24].

$$\dot{Q}_q = \dot{m}_q c_{pq}(T_{q,e} - T_{q,s})$$

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f c_{pf}(T_{f,s} - T_{f,e}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_q = \dot{Q}_f = \dot{Q}$$

2.9 Visão geral sobre o *software* de simulação dinâmica *TRACE 700*

O *software TRACE 700 – Trane Air Conditioning Economics*, foi desenvolvida pela empresa "*TRANE company*", um fabricante de equipamento de climatização. O *software* não é gratuito, sendo necessário uma licença para a sua instalação. O programa opera em ambiente Windows e permite a simulação energética de edifícios, através do cálculo das cargas térmicas e da análise económico-energética, possibilitando a otimização do sistema. Possui uma interface intuitiva, de fácil interação com o utilizador, e já se encontra bastante divulgado, ao nível de projeto, sendo creditado pela norma *ASHRAE 140-2004*, que avalia a aplicabilidade de cada *software* de cálculo de cargas térmicas [25].

Com o programa é possível fazer a modelação do sistema com várias opções de equipamentos, e realizar a análise do custo energético e do tempo de retorno de investimento de cada modelo. Para tal, o *software* permite a criação até quatro modelos diferentes facilitando a comparação entre eles e ajudando na escolha do melhor resultado. Além disso, é possível inserir e alterar detalhes da construção, assim modificar o modelo a qualquer momento durante a realização do projeto. O programa contém extensas bibliotecas com informações de materiais de construção, cargas internas (pessoas e equipamentos), programação (*schedule*) de funcionamento do edifício, bem como equipamentos de climatização. Existe

também a possibilidade de se introduzir componentes personalizados, como envolventes, envidraçados e equipamentos a esta mesma biblioteca. No entanto o programa não permite a criação de sistemas de climatização, para além daqueles já incluídos na respetiva base de dados.

A biblioteca de dados climáticos do *TRACE 700* possui já uma base de dados climáticos com 448 localidades em todo o mundo, incluindo o Porto. Existe ainda a possibilidade de importar um ficheiro climático de um dado local que não esteja presente na biblioteca, com dados para as 8760 horas do ano, que apresente a extensão *".tmy" (typical meteorological year)*. Os ficheiros climáticos com esta extensão consistem em valores anuais obtidos através da conjugação de informação resultante da evolução dos parâmetros climáticos durante cerca de 30 anos.

A interface do *TRACE 700* divide-se em 3 modos diferentes: um navegador de projeto, uma árvore de projeto e uma árvore de componentes. O navegador de projeto, onde se realiza a entrada de dados no programa, contém as informações do projeto, clima, atribuição de quartos aos respetivos sistemas de climatização, atribuições dos sistemas de climatização a cada planta e ainda, a informação relativa à economia. A árvore do projeto é uma árvore que organiza o projeto por zonas e sistemas, tornando a análise de dados mais fácil e intuitiva. Por sua vez, a árvore de componentes facilita a edição de dados, quando se trata de múltiplos componentes. O programa é constituído por cinco fases fundamentais, que em conjunto permitem obter uma análise energética e económica completa do edifício em estudo, sendo elas, *load, design, system simulations, equipment simulation e economic analysis*. Na Figura 20 está representado um diagrama simplificado com a organização funcional do *software* [26, 27].

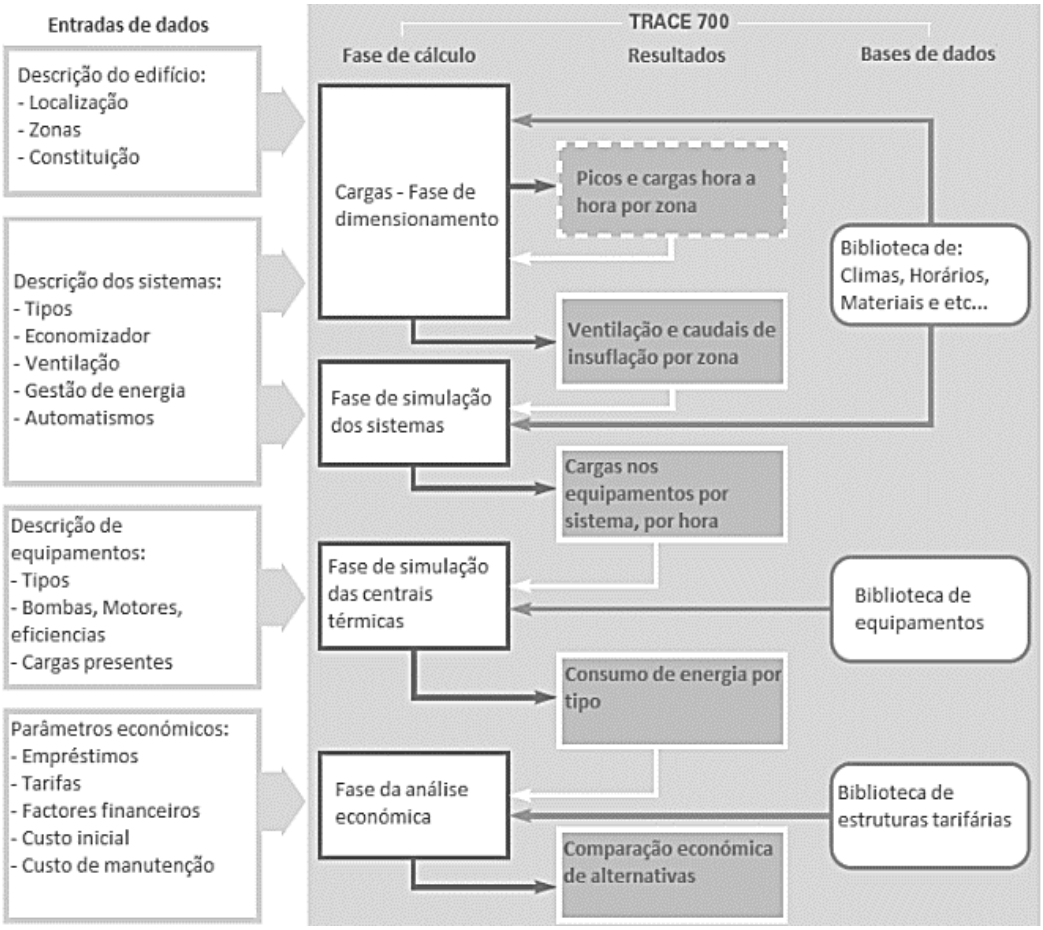


Figura 20 - Diagrama funcional do *TRACE 700* (Adaptado de TRACE700 User's Manual p.2-3) [27].

3 Enquadramento do Caso de Estudo

O presente estudo incide na análise do comportamento térmico e energético do edifício – Termas Fonte Santa de Almeida. Neste capítulo é descrito integralmente o edifício em estudo. São abordados temas como a localização geográfica, a orientação do edifício, o período de funcionamento, a definição da envolvente, os horários de utilização e respetivas densidades, bem como os horários relativos a equipamentos e iluminação e ainda, a caracterização dos sistemas AVAC presentes.

3.1 Caracterização Geral do Edifício

O edifício em estudo apresenta uma tipologia, perante o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços, RECS, "Piscina coberta aquecida" e, devido à sua área, classifica-se, no âmbito do sistema de certificação energética dos edifícios, SCE, como um "Grande edifício de serviços" (GES), com uma potência instalada superior a 25 kW [28, 29]. Este foi licenciado em 2006. É constituído por 3 pisos, dois acima da cota do solo e outro semienterrado. Apresenta uma área útil de 2247 m^2 e um pé direito médio de 3,03 m, valores expostos na Tabela 4. O complexo termal é formado por uma área de tratamentos (balneoterapia), ginásios, sauna, banhos turcos, gabinetes de massagem e uma área médica constituída por sala de espera secretaria médica, gabinete médico e gabinete do diretor clínico. As plantas do edifício foram fornecidas por diversas entidades relacionadas com este projeto (Câmara de Almeida, ENERAREA e Associação de Municípios de Cova da Beira), em *AutoCAD*, e encontram-se no anexo A (modelo criado em *REVIT* a partir das plantas fornecidas).

Tabela 4 - Caracterização do edifício.

Tipologia	Área útil [m^2]	Pé direito médio [m]
Piscina Coberta Aquecida	2247	3,03

As Termas de Fonte Santa apenas funcionam durante a época de 22 de maio a 12 de novembro, sendo que a sua ocupação diurna decorre das 09:00 h às 12:00 h e das 16:00 h às 20:00 h, de segunda a sábado, incluindo feriados, encontrando-se as instalações encerradas ao domingo. Na Figura 21 encontra-se uma imagem real do edifício em estudo.



Figura 21 – Edifício Termal de Fonte Santa, Almeida.

3.2 Localização e Caracterização Geológica do Município de Almeida

Geograficamente, o complexo termal em estudo localiza-se na freguesia de Almeida, concelho de Almeida pertencente ao distrito da Guarda, com as coordenadas GPS – latitude: 40º 44'43''N e longitude: -6º56'54''W (Figura 22). A orientação do edifício pode ser observada através da Figura 23, retirada do *Google Earth* [30]. A fachada principal está orientada na direção nordeste (NE). O edifício encontra-se situado numa zona sem obstruções significativas de sombreamento, distando 142,3 km da costa marítima e elevado a 591 metros.

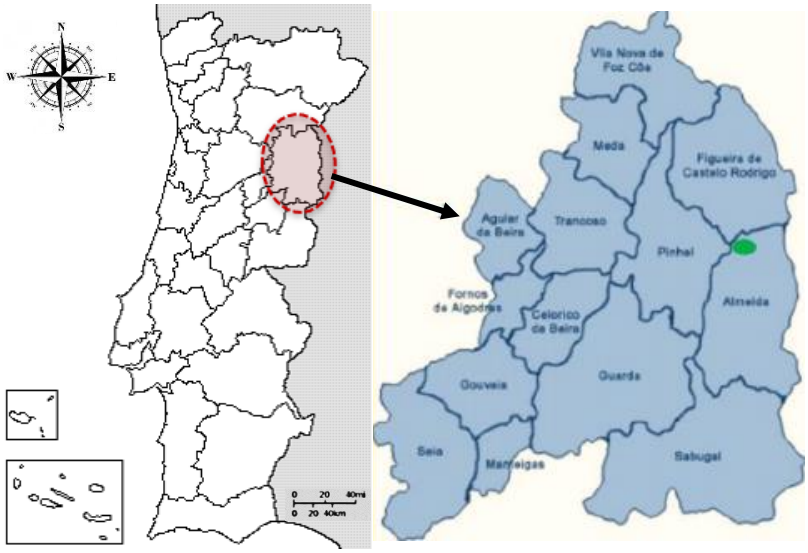


Figura 22 - Localização Geográfica das Termas de Fonte Santa.



Figura 23 - Orientação do edifício: nordeste [30].

Geologicamente, as Termas da Fonte Santa de Almeida localizam-se na Zona Centro-Ibérica do Maciço Ibérico. A morfologia em blocos e a intensa fracturação, aliadas a uma litologia constituída por rochas graníticas e por rochas sedimentares metamorfizadas, criaram, na Zona Centro-Ibérica, condições para a existência de um maior número de ocorrências geotérmicas de baixa e muito baixa entalpia conhecidas no país. No total, 63% das ocorrências geotérmicas conhecidas em Portugal Continental encontram-se nesta Zona.

As ocorrências geotérmicas registadas no território de Portugal Continental têm uma composição química que está diretamente relacionada com o tipo litológico das formações geológicas que atravessam. Assim, as águas das Termas de Fonte Santa, podem ser classificadas como águas sulfúreas, bicarbonatadas e sódicas e classificam-se como fracamente mineralizadas [1].

3.3 Caracterização Climática do Município de Almeida

O enquadramento climático do edifício revela-se um elemento fundamental para a análise do seu desempenho energético. De acordo com o descrito no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços, RECS, o país baseia-se na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de nível III, cuja composição por municípios é definida pelo Decreto-Lei nº 68/2008 de 14 de abril de 2008, entretanto alterado pelo Decreto-Lei n.º 85/2009, de 3 de abril e pela Lei n.º 21/2010 de 23 de agosto [31, 32]. O país divide-se em três zonas climáticas de Inverno (I_1, I_2, I_3) e três zonas climáticas de Verão (V_1, V_2, V_3) e a sua delimitação surge na Figura 24, assim como a localização do presente projeto que se encontra assinalada com uma cruz vermelha.

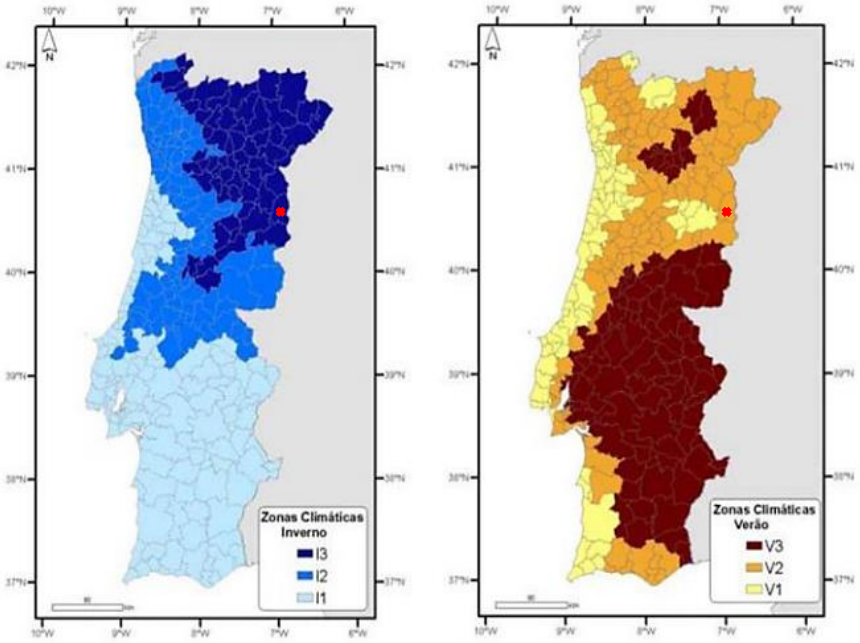


Figura 24 - Zonas Climáticas de Inverno (à esquerda) e Zonas Climáticas de Verão (à direta) (Adaptado de [32]).

Na Figura 24 é possível verificar que o município de Almeida possui a zona climática de Inverno I_3 e de Verão V_2. A Tabela 5 contém a informação climática para o edifício em estudo.

Tabela 5 - Dados Climáticos do edifício (Fonte: LNEG).

Zona Climática de Inverno	$\boldsymbol{I_3}$
Duração da Estação de Aquecimento	7,50 Meses
Energia Solar Média Mensal	135 kWh/m^2.mês
N.º Graus- Dias de Aquecimento	1798 Dias
Temperatura Exterior Média	6,68 °C
Zona Climática de Verão	$\boldsymbol{V_2}$
Duração da Estação de Arrefecimento	2928 horas
Temperatura Exterior Média	22,33 °C
Radiação Solar Média de Referência	495 kWh/m^2

3.4 Caracterização da Envolvente do Edifício

É através da envolvente exterior opaca do edifício que ocorre grande parte das trocas térmicas entre o interior e o exterior, influenciando as cargas térmicas a vencer, sendo de grande importância o estudo cuidado do comportamento térmico das soluções construtivas a adotar, de forma a otimizar os consumos energéticos e os custos de investimento.

A envolvente do edifício deverá respeitar a legislação em vigor à data de licenciamento (2006). Devido às plantas não possuírem elementos que permitam identificar com o detalhe necessário as soluções construtivas utilizadas, para se poder definir os respetivos coeficientes de transmissão térmica (U), foi necessário recorrer à legislação e, paralelamente, a um documento EXCEL com o qual foi possível obter os valores dos coeficientes de transmissão térmica. Primeiramente, foi realizado o levantamento das envolventes (Tabela 6) recorrendo à planta do edifício, através da qual foi possível também obter a espessura de cada elemento construtivo.

Tabela 6 - Levantamento das áreas da envolvente.

	Paredes exteriores	**Vãos envidraçados**	**Cobertura**	**Pavimento exterior**	**Pavimento em contacto com o solo**
m^2	675	335	1129	106	1012

Na Tabela 7 encontram-se os valores de referência para os coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis, dos elementos opacos e dos vãos envidraçados, em função da zona climática de Portugal. Estes valores são definidos pelo RECS, não sendo de carácter obrigatório, e permite também comparar as alterações sofridas a 1 de janeiro de 2016 [33].

Por sua vez na Tabela 8 apresentam-se os elementos construtivos, relativos à envolvente, utilizados para a solução final, com os respetivos valores de coeficiente de transmissão térmica, U. Este, traduz a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que ele separa, sendo o seu cálculo resultante da soma do inverso das resistências térmicas das diversas camadas que constituem a envolvente, bem como das resistências superficiais interior e exterior. A cobertura e os vãos envidraçados presentes no edifício serão analisados de seguida, mais detalhadamente, por requererem um maior cuidado na sua análise. Para a restante envolvente, que diz respeito às paredes e pavimentos, optou-se por usar soluções construtivas já existentes na biblioteca do TRACE 700, por não haver informação suficiente acerca da constituição das mesmas. Assim, adotaram-se os coeficientes de transmissão térmica expostos no certificado energético da ADENE, e a constituição desta envolvente encontra-se, no anexo B. Toda a caracterização térmica da envolvente foi feita tendo por base o documento do laboratório nacional de engenharia civil (LNEC) – "ITE 50: Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios" [34].

Tabela 7 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, U_{ref} [W/m^2°C] de acordo com a zona climática em Portugal Continental [33].

U_{ref} [W/m^2°C]		**Zona Climática**					
Zona Corrente da Envolvente		Com a entrada em vigor do presente regulamento			A partir de 1 de janeiro de 2016		
		I1	**I2**	**I3**	**I1**	**I2**	**I3**
Em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas b_{tr} > 0,7	Elementos opacos verticais	0,50	0,40	0,35	0,50	0,40	0,35
	Elementos opacos horizontais	0,40	0,35	0,30	0,40	0,35	0,30
Em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas b_{tr} < 0,7	Elementos opacos verticais	1,00	0,80	0,70	0,80	0,70	0,60
	Elementos opacos horizontais	0,80	0,70	0,60	0,60	0,60	0,50
Vãos envidraçados (portas e janelas) (U_w)		2,90	2,60	2,40	2,80	2,40	2,20
Elementos em contacto com o solo			0,50			0,50	

Tabela 8 - Coeficientes de transmissão térmica dos elementos construtivos do edifício.

Tipo	**Designação**	**Descrição**	**U [W/m^2°C]**
Cobertura	COB-3	Do interior para o exterior: bloco de betão 220 mm + caixa de ar + EPS I + caixa de ar + alumínio com 10 mm.	0,57
Parede exterior	PE-1	Do interior para o exterior: alvenaria (0,30 – 0,34 m), incluindo revestimentos exterior e interior (solução construtiva expectável).	1,10
Parede exterior (em contacto com o solo)	PSR-1	Do interior para o exterior: alvenaria (0,30 – 0,34 m), incluindo revestimentos exterior e interior (solução construtiva expectável).	1,10
Pavimento (em contacto com o solo)	PAV-1	Do interior para o exterior: betão (solução construtiva expectável)	3,10
Pavimento (em contacto com o exterior)	PAV-3	Do interior para o exterior: betão (solução construtiva expectável)	3,10

3.4.1. Cobertura

Segundo o ITE50, no capítulo 3.2 – "Resistências Térmicas de espaços de ar", para espaços de ar fortemente ventilados, como é o presente caso, em que a relação s/A, sendo s a área total de orifícios de ventilação, em [mm²] e A a área do elemento em estudo, em [m^2], é superior a 1500 mm²/m², a resistência do espaço de ar considera-se nula (R_{ar}=0). Neste caso, adotam-se as seguintes convenções: não se considera a resistência térmica das camadas que se localizam entre o espaço de ar e o ambiente exterior, e a resistência térmica superficial exterior (R_{se}) toma o valor correspondente da resistência térmica superficial interior (R_{si}), a qual se encontra indicada no quadro I.3 do Anexo 1 do ITE50, relativo a coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios, apresentado na Tabela 9 [34].

Tabela 9 - Quadro I.3: Resistência Térmicas Superficiais [34].

Sentido do Fluxo de Calor	**Resistência Térmica Superficial [(m^2.°C) / W]**	
	Exterior (R_{se})	Interior (R_{si})
Horizontal	0,04	0,13
Vertical		
Ascendente	0,04	0,10
Descendente	0,04	0,17

Assim, analisando a Tabela 9 e tendo em conta que estamos perante um sentido do fluxo de calor vertical ascendente, R_{se} =R_{si}= 0,10 (m². °C)/W. A solução de referência escolhida para esta tipologia foi uma parede constituída, do interior para o exterior por: 220 mm de betão, uma camada de ar de 45 mm, um isolamento EPS de 40 mm, uma camada de ar de 45 mm e 10 mm de alumínio. O coeficiente de transmissão térmica (U) é igual a 0,57 W/(m².°C), como se pode constatar pela Tabela 10.

Tabela 10 - Valor do U da cobertura - Método de Cálculo EN ISO 13786.

	Situação	**Cobertura Interna ($R_{se} = R_{si} = 0,10$)**			
	Material	**Espessura [m]**	**λ [W/mK]**	**Densidade [Kg/m^3]**	**U [W/m^2 °C]**
Exterior	Alumínio	0,010	204,000	2700	
	Camada de ar (2 a 5cm)	0,045	0,310	1	
	Isolamento EPS I (9-10 kg/m^3)	0,040	0,047	10	0,57
	Camada de ar (2 a 5cm)	0,045	0,310	1	
Interior	Bloco de Betão 1200 Kg/m^3	0,220	0,490	1200	

3.4.2. Vãos envidraçados

O edifício é composto por 335 m^2 de vãos envidraçados. Os vãos envidraçados consistem, segundo o certificado energético da ADENE, em vãos simples inseridos na fachada exterior, caixilharia do tipo janelas de alumínio ou aço, giratória, sem corte térmico e sem permeabilidade, com vidro duplo incolor (4 a 8) mm, com proteção interior com cortinas opacas. O coeficiente global de transferência de calor utilizado para os vidros foi de 1,74 W/$m^2\ °C$.

Na Tabela 11 a seguir, apresentam-se as percentagens dos vãos envidraçados distribuídos pelas quatro fachadas principais do edifício nas respetivas orientações geográficas, obtidas através das plantas fornecidas pelas entidades já enunciadas. A parede orientada a sudoeste, que é a parede afeta ao espaço da piscina é aquela que apresenta a maior percentagem de vãos envidraçados (88%).

Tabela 11 - Distribuição dos vãos envidraçados pelo edifício consoante a sua orientação.

	Área da fachada [m^2]	**Percentagem de envidraçado na fachada [%]**
NE (nordeste)	130	61 %
SE (sudeste)	250	14%
NO (noroeste)	245	69%
SO (sudoeste)	54	88%
Total	679	

O fator solar de um vão envidraçado, g_T, é o quociente entre a energia solar transmitida para o interior através de um vão envidraçado com o respetivo dispositivo de proteção e a energia da radiação solar que nele incide. O fator solar de um vidro é o quociente entre a energia solar transmitida através do vidro para o interior e a energia solar nele incidente. O RCCTE impõe valores de fator solar máximos admissíveis dos vãos envidraçados em função da classe de inércia térmica e da zona climática, como se constata na Tabela 12 (Quadro IX.2 do Anexo IX do RCCTE). Uma vez que o edifício está inserido na zona climática V_2 e apresenta uma classe de inércia média, o fator solar máximo é de 0,56 [35].

Tabela 12 - Fatores solares máximos admissíveis dos vãos envidraçados para a classe de inércia média [35].

g_{Tmax} por zona climática (classe de inércia térmica: média)		
V_1	V_2	V_3
0,56	0,56	0,50

O fator solar global dos envidraçados, $g_\perp$, utilizado na simulação foi 0,38, segundo o certificado da ADENE, estando este valor de acordo com a regulamentação. Para caracterizar os envidraçados é necessário recorrer ao coeficiente de sombreamento (*shading coefficient*). A conversão foi obtida através da fórmula que se segue, retirada do "*2005 ASHRAE Handbook Fundamentals*" [36].

$$coeficiente\ de\ sombreamento = \frac{g_{\perp}}{0{,}87} = 0{,}44 \quad (2)$$

3.5 Inércia Térmica

A inércia térmica de um edifício é sempre função da capacidade de armazenamento de calor que cada compartimento apresenta e depende da massa superficial útil de cada um dos elementos da construção, como das soluções utilizadas para o isolamento térmico e do revestimento superficial. A massa superficial útil por metro quadrado de área de pavimento (I_t) é calculada pela seguinte expressão:

$$I_t = \frac{\sum M_{si} S_i r_i}{A_p} \quad (3)$$

Em que,

M_{si} – Massa superficial útil do elemento i (Kg/m^2);

S_i – Área de superfície inferior do elemento i (m^2);

A_p – Área útil do pavimento (m^2);

r_i – Fator de correção: pode assumir valores entre 0,5 e 1,00 dependendo da resistência térmica do isolamento.

Por falta de informação para a realização do cálculo analítico da classe de inércia térmica do edifício em estudo, foi tido por base o método de alternativa à determinação desta, que é efetuado de acordo com as condições descritas na Tabela C.1 do anexo C, com base nas soluções e revestimentos implementados no edifício, considerando que:

I. No caso de não se verificarem, cumulativamente, os requisitos que definem a classe de inércia térmica Forte ou Fraca, se deve considerar classe de inércia térmica Média;
II. Nas situações de dúvida entre o tipo de inércia Forte ou Média, deve-se optar pela inércia térmica Média;
III. Nas situações de dúvida entre o tipo de inércia térmica Média ou Fraca, se deve optar pela inércia térmica Fraca.

Assim, conclui-se que o edifício em estudo apresenta uma inércia térmica Média.

3.6 Condições exteriores de projeto

Na Tabela 13 surgem apresentadas as condições exteriores para o local em estudo, retiradas do ficheiro gerado pelo LNEG – laboratório nacional de energia e geologia.

Tabela 13 - Condições exteriores no local.

	Verão (˚C)	**Inverno (˚C)**
T_{bs} (Temperatura de bolbo seco), probabilidade de ocorrência 2,5%	31,6	- 10,2
T_{bh} (Temperatura de bolbo húmido)	20,3	

3.7 Condições interiores de projeto - Caracterização dos espaços

Os perfis de utilização que dizem respeito à ocupação, iluminação e equipamentos do edifício tentaram ao máximo seguir o modelo da realidade, sempre de acordo com a regulamentação apropriada. Estes perfis, que podem ser encontrados detalhadamente no anexo D, foram realizados para 4 zonas diferentes que requeriam diferentes densidades de ocupação, das quais fazem parte as zonas comuns, zonas de gabinetes, áreas de terapia e piscina.

3.7.1. Densidades de Ocupação, Equipamentos e Iluminação

Por falta de informação real relativa ao edifício em estudo e de modo a se obter uma aproximação fiável das cargas internas, utilizou-se como base os padrões de referência de utilização dos edifícios, sendo que as respetivas densidades da ocupação, iluminação e das potências dos equipamentos interiores adotadas para cada tipologia se encontram na Tabela 14. Recorreu-se também aos valores de referência de densidade de ocupação indicados na norma ASHRAE 62.1 [37, 38].

Tabela 14 - Densidade adotada para cada tipologia.

	Ocupação [m^2/ocupante]	**Iluminação [W/m^2]**	**Equipamento [W/m^2]**
Zonas de circulação	0	15	0
Zonas de Ginásio	7	15	15
Zonas de Escritórios	15	15	15
Zonas de terapia	10	15	20
Zonas Comuns	15	15	15
Piscina	7	15	1

3.7.2. Caudais mínimos de ar novo

No caso de estudo presente procurou-se caracterizar o edifício em várias tipologias, no que respeita à definição de caudais de ar novo, de forma a garantir os valores nominais regulamentares, e de forma a aproximar, o máximo possível, os resultados da simulação ao caso real. Os caudais de ar novo considerados, são estabelecidos com base na portaria n.º 353-A/2013 - Requisitos de ventilação e qualidade do ar interior, de 4 de dezembro, que estabelece os valores mínimos de caudal de ar novo por espaço, previstos no RECS. Estes valores apresentam-se de seguida, na Tabela 15 [28].

Tabela 15 - Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida à ocupação, [m3 /(hora.pessoa)] [28].

Tipo de atividade	Taxa de metabolismo dos ocupantes - M (met)	Exemplos de tipo de espaço	Caudal de ar novo [m^3/(hora.pessoa)]
Sono	0,8	Quartos, Dormitórios e similares	16
Descanso	1,0	Salas de repouso, Salas de espera, Salas de conferências, Auditórios e similares, Bibliotecas.	20
Sedentária	1,2	Escritórios, Gabinetes, Secretarias, Salas de aula, Cinemas, Salas de espetáculo, Salas de Refeições, Lojas e similares, Museus e galerias, Salas de convívio, Salas de atividade de estabelecimentos de geriatria e similares.	24
		Salas de jardim de infância e pré-escolar e Salas de creche.	28
Moderada	1,75 (1,4 a 2,0)	Laboratórios, Ateliers, Salas de Desenho e Trabalhos Oficinais, Cafés, Bares, Salas de Jogos e similares.	35
Ligeiramente Alta	2,5 (2,0 a 3,0)	Pistas de dança, Salas em ginásios, Salas de ballet e similares	49
Alta	5,0 (3,0 a 9,0)	Salas de musculação, Salas em ginásios e pavilhões desportivos e similares	98

No caso das piscinas, o caudal mínimo de ar novo deverá ser calculado com base no valor 20 m^3/(hora.m^2), em que a área de referência será a área do plano da água. Excluem-se do cumprimento de valores de caudal mínimo de ar novo ou da verificação de condições de adequada ventilação natural, espaços sem ocupação permanente, designadamente, zonas de circulação, balneários, instalações sanitárias, arrumos, copas ou espaços que são ocupados ocasionalmente por períodos inferiores a 2 horas por dia [28]. Deste modo, os caudais de ar novo para cada zona, seguiram a legislação, e apresentam-se na Tabela 16 a seguir.

Tabela 16 - Caudais de ar novo para cada tipologia.

Tipologia	**[m^3/h/m^2]**
Zonas de circulação	2,99
Zonas de ginásio	21,02
Zonas de escritórios	6,41
Áreas Terapêuticas de Massagens	31,57
Áreas Terapêuticas de Tratamentos	26,35
Zonas comuns	24,08
Piscina	20,16
Entrada	5,07
Vestiários	24,73

3.8 Definição do Sistema Convencional de Ventilação e Climatização

Com o projeto AVAC, é possível tratar de forma independente as diversas zonas, em função das condições pretendidas. Os sistemas em análise são constituídos por unidades de tratamento de ar (UTA's) e ventiloconvectores (VC's), os quais permitem satisfazer as necessidades de qualidade do ar interior, limitando os níveis de dióxido de carbono e evacuando cheiros decorrentes da utilização das instalações sanitárias.

3.8.1. Sistema de Ventilação

Para o tratamento e renovação do ar novo dos respetivos espaços interiores do edifício, existem instaladas 5 UTA's. As unidades são constituídas por ventiladores de insuflação e extração de acoplamento direto, com vários estágios de filtragem. A partir das unidades de tratamento de ar desenvolvem-se os ramais de insuflação e extração, constituídas por condutas em chapa galvanizada isolada. O ar novo destinado aos espaços interiores é distribuído através de difusores/grelha de teto. O caudal do ar de insuflação total, respeitante apenas a caudal de ar novo, para o edifício em estudo é de 26300,00m^3/h. As várias unidades de tratamento de ar presentes no edifício termal, apresentam-se na Tabela 17, juntamente com o seu caudal de ar novo e a sua potência em arrefecimento e em aquecimento.

Tabela 17 - Unidades de Tratamento de Ar Novo e suas características.

	TIPO	Arrefecimento (kW)	Aquecimento (kW)	Ar tratado ($\mathbf{m^3/h}$)	Ar novo ($\mathbf{m^3/h}$)	PE (Pa)
UTV 1	100% AN	-	18	2000	2000	150
UTV 2	100% AN	-	45	4400	4400	200
UTV 3	100% AN	-	70	7500	7500	200
UTA 4	-	30	25	4200	1200	250
UTV 5	100% AN	-	22	2400	2400	200

Os espaços de climatização foram atribuídos a cada UTA de acordo com as plantas de climatização fornecidas. A unidade de termoventilação 1, UTV 1, abrange toda a área climatizada relativa ao piso -1, desde a sala do pessoal, copa, limpeza, arrumos, roupa suja, tratamento de roupa e vestiários. A UTV 2 é responsável pela climatização da zona que diz respeito aos tratamentos, no piso 0, que abrange todas as salas de hidromassagem, vapor membros, estufa de vapor, *pedidaix* e *thalaxion*. A UTV 3 é responsável pela climatização da zona dos balneários no piso 0. A UTA 4, inclui toda a zona do bar e da circulação à entrada do piso 0, bem como a circulação respetiva ao piso 1. Por fim, a UTV 5 é responsável pela climatização da zona de massagens do piso 1, que contém as salas de massagem, a sauna, o banho turco e a antecâmara/duches. A respetiva atribuição dos sistemas de climatização a cada espaço pode ser encontrada no anexo E.

Os ventiloconvectores são os equipamentos responsáveis pela filtragem, arrefecimento ou aquecimento do ar nos locais a climatizar e estes podem ser consultados no anexo F, onde se caracterizam pelas potências de aquecimento e arrefecimento.

Para a piscina é necessária uma unidade desumidificadora do ar, que garante o controlo de temperatura e humidade na nave da piscina, que apresenta as características representadas na Tabela 18. O sistema existente, é composto por uma unidade de desumidificação com ciclo frigorífico interno e com bateria de aquecimento do ar ambiente, sendo esta interligada a duas caldeiras de chão.

Tabela 18 - Características da Unidade Desumidificadora da Piscina (UDP).

Capacidade de desumidificação por efeito frigorifico	21,7 Kg/h
Caudal de insuflação	6000 m^3/h
Caudal de ar novo	1000 m^3/h
Potência de aquecimento	40 kW
Potência de arrefecimento	31,6 kW

3.8.2. Unidades produtoras de Aquecimento/Arrefecimento

De seguida expõem-se os equipamentos responsáveis pelo arrefecimento e aquecimento, existentes no edifício. O *chiller* localiza-se na cobertura (Figura 26) e é equipado com compressores herméticos do tipo *Scroll*, evaporador de placas, condensador arrefecido a ar e microprocessador. O fluido de trabalho é o refrigerante R407C. O *chiller* é responsável pelo arrefecimento dos espaços interiores por via dos ventiloconvectores e da UTA 4, e pela produção de água refrigerada. Este apresenta uma potência de arrefecimento de 90 kW e uma *EER (energy efficiency ratio)* de 2,7.

As caldeiras de chão com vetor energético a gás natural (Figura 25), encontram-se na área técnica, no piso -1, e estas estão ligadas aos ventiloconcetores existentes e UTA's. Cada caldeira tem uma potência nominal de 310 kW, o que perfaz uma potência total de 620 kW instalados, e um rendimento de 0,9211.



Figura 26 - Sistema de produção de arrefecimento das Termas de Fonte Santa.



Figura 25 - Sistema de produção de aquecimento das Termas de Fonte Santa.

3.9 Água Quente Sanitária (AQS)

A produção de água quente é assegurada pelas caldeiras. Estas fornecem energia térmica aos depósitos de 2000 litros que se encontram na zona técnica. A energia térmica produzida pela caldeira de chão é transportada e distribuída sobre forma de água quente até aos permutadores de placas, procedendo depois ao aquecimento da água da piscina bem como da água termal a utilizar pelo edifício. A água quente sanitária é mantida a uma temperatura de 60 °C para eliminar a ocorrência de *legionella* em todos os sistemas descritos e garantir uma temperatura de 45 °C para consumo. A temperatura da rede é 15 °C. O perfil de AQS do edifício, em função da ocupação e dos dias da semana e fins de semana, pode ser consultado no anexo G.

As tabelas seguintes apresentam o levantamento dos equipamentos consumidores de água quente sanitária do edifício (Tabela 19), e os respetivos consumos por parte de cada um (Tabela 20), que irão permitir o cálculo do consumo AQS do edifício .

Tabela 19 - Levantamento dos equipamentos consumidores de AQS no edifício.

Produção de Água Quente Sanitária				
	Piso			**Total**
Aparelhos	**-1**	**0**	**1**	
Lavatórios	2	9	4	15
Duches	2	12	4	18
Lava-Louças		2		2

Tabela 20 - Consumo de AQS do edifício [L/h].

Aparelhos	**Número de Aparelhos**	**Consumos [L/h]**	
		Unitário	Total
Lavatórios	15	15	225
Duches	18	45	810
Lava-Louças	2	20	40
Total			1075

4 Simulação Dinâmica do Edifício

Neste capítulo descrevem-se todos os passos necessários para determinar quais as cargas térmicas solicitadas pelo edifício, e aproximá-las do comportamento real, bem como os caudais de insuflação e potências de cada sistema de climatização. Aqui expõem-se os *softwares* utilizados durante este processo, e as suas funcionalidades, sendo que a teoria por detrás do principal *software* utilizado, *TRACE 700*, foi já abordada no capítulo 2. Assim apresenta-se, detalhadamente, o trabalho de simulação desenvolvido, com a justificação de cada parâmetro selecionado. Por fim, descrevem-se os resultados obtidos, acompanhados por uma análise energética do edifico juntamente com a desagregação dos consumos por utilização final e, sempre que possível fundamentam-se os mesmos. Tudo isto tornará possível a implementação das devidas medidas de racionalização de energia, a descrever no capítulo 5.

4.1 Enquadramento Regulamentar

Ao longo das diversas simulações, foi sempre verificado o cumprimento dos regulamentos e nomas em vigor, já enunciadas diversas vezes anteriormente, o Regulamento do Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos edifícios – SCE [39].

Em agosto de 2013 surgiu o Decreto-Lei n.º 118/2013, que veio assegurar uma revisão da legislação nacional, envolvendo alterações a vários níveis, sistematizando num só diploma a matéria anteriormente regulada em três diplomas distintos. Este veio promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios, que se consubstancia em melhorias ao nível da sistematização e âmbito de aplicação ao incluir o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação (REH) e o regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços (RECS). A nova regulamentação introduz alterações ao nível da sua aplicabilidade, organização, sistematização e metodologia [40].

4.2 Metodologia Aplicada ao Caso de Estudo

Para uma completa caracterização do edifício, é necessário fazer um estudo detalhado, que já foi revelado em parte no capítulo anterior. Sendo que o cálculo das cargas térmicas considera todas as solicitações do edifício em termos de ocupação, iluminação, sistemas de climatização, ventilação, AQS, entre outros, é necessário enunciar o método que foi seguido para conseguir aproximar ao máximo o comportamento do modelo de simulação ao comportamento real do edifício.

O desenvolvimento do modelo dinâmico passa, inicialmente, pela definição da sua localização geográfica, simultaneamente com a introdução dos dados climáticos. Continuamente, define-se a geometria do edifício, as respetivas zonas térmicas que são caracterizadas pelas suas condições interiores, envolventes e cargas térmicas derivadas da ocupação, iluminação e equipamentos, implementando-se também a ventilação de cada espaço. Após isto, são criados os sistemas de climatização, aos quais, posteriormente, são atribuídas as respetivas zonas térmicas por eles servidas. Estes sistemas, serão alimentados por equipamentos, as *plants*, que dizem respeito às unidades de produção térmica da instalação. No final, é possível definir a economia, que permite realizar uma análise económica do projeto. Todas estas etapas são realizadas no programa, através das várias opções presentes no navegador de projeto, representado na Figura 27.

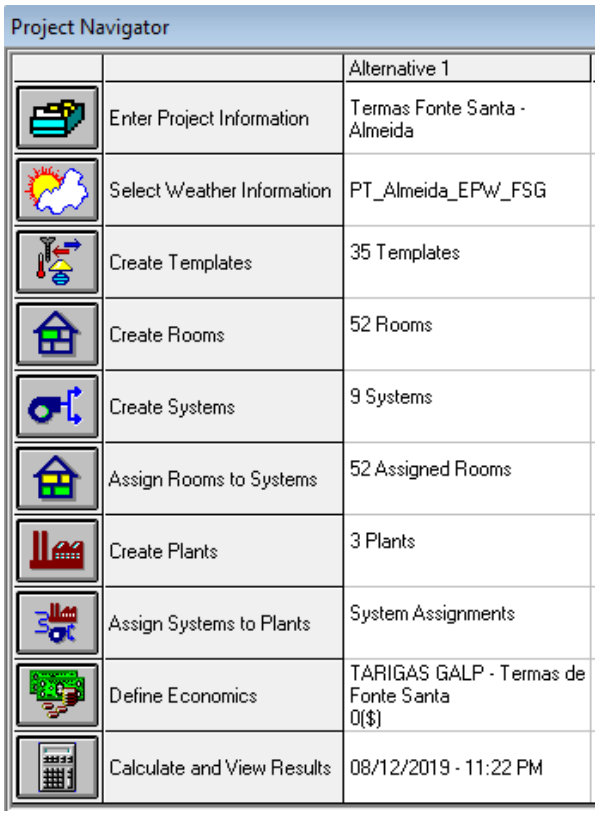


Figura 27 - Navegador de Projeto do *TRACE 700*.

4.2.1. Introduzir informação climática (“*Select Weather Information*”)

O ficheiro climático que contém os dados para as 8760 horas anuais, relativos ao município de Almeida, foi gerado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia, LNEG, para importar no *TRACE 700*. Este tipo de ficheiro contém os valores anuais obtidos através da conjugação de informação obtida ao longo de vários anos. O ficheiro encontrava-se no formato “*.epw”*, que não é reconhecido pelo *software*, tendo sido convertido para a extensão “*.tmy”*. Importante referir que foi feita uma correção climática devido à altitude, para uma altitude igual a 591 metros, uma vez que a altitude no programa para o concelho de Almeida era 717. A sua importação no programa foi feita através da “*weather library*”. O respetivo ficheiro gerado em *EXCEL* pode ser encontrado no anexo H.

4.2.2. Criação de *Templates (“Create Templates”)*

Os *templates* representam modelos tipo que contêm informação subjacente em diferentes espaços, como por exemplo, elementos construtivos, cargas internas e caudais de insuflação, facilitando bastante a modelação do edifício. Ao utilizar um *template* para um dado espaço, os dados relativos a esse template são automaticamente preenchidos, podendo ser editados individualmente, permitindo diminuir o erro de modelação. Deste modo, no projeto foram criados 35 *templates*. A Figura 28 contém alguns dos separadores necessários para criar um *template*.

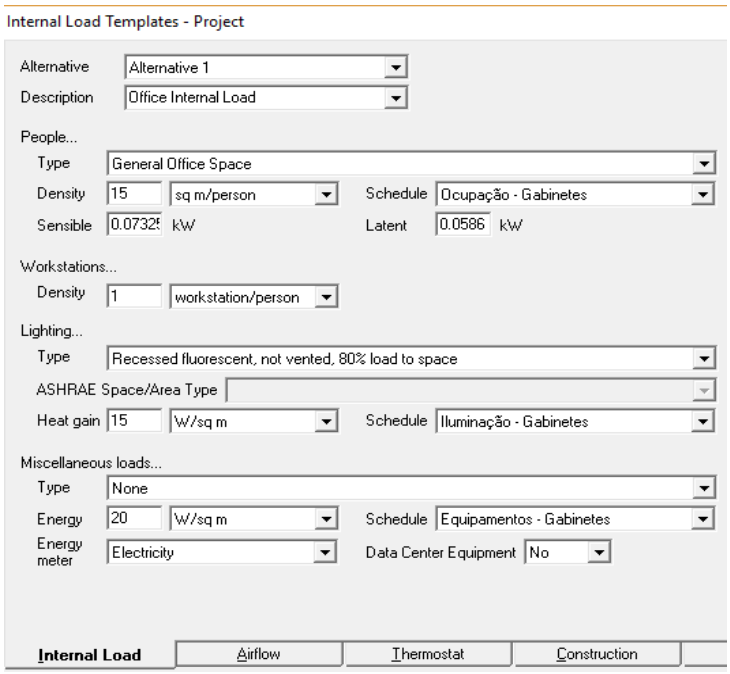


Figura 28 - Janela "*Create Templates*".

Na aba apresentada na Figura 28, “*internal load*” definem-se as densidades relativas à ocupação, iluminação e equipamentos, já definidas na Tabela 14, bem como os seus horários de utilização relativos a cada tipologia, que por sua vez foram definidos em “*schedule library*” (anexo D).

Em “*airflow*” definem-se os caudais de insuflação já definidos para cada tipologia no subcapítulo 3.7.2 na Tabela 16. Na aba “*thermostat*” definem-se condições de referência interiores dos espaços úteis. Tomaram-se como valores convencionais de temperatura do ar interior capazes de satisfazer as exigências de conforto térmico, 24 °C na estação de arrefecimento e 21 °C na estação de aquecimento, fixando-se a humidade relativa nos 50%. Estes valores foram adotados para todos os espaços com

exceção do espaço piscina, que será tratado mais à frente. Quanto à definição da envolvente, na aba "*construction*", criou-se apenas um template global, "Termas Fonte Santa *Construction*". Os coeficientes de transmissão térmica, foram os enunciados no capítulo anterior na Tabela 8. As envolventes podem ser previamente definidas na biblioteca "*Construction Types*", por camadas, mas no presente relatório, foram usados elementos já existentes, por falta de informação.

4.2.3. Criação de Espaços ("*Create Rooms*")

Nesta secção, definem-se os diversos espaços existentes no edifício. Para facilitar este processo, foi necessário recorrer ao *software REVIT* que permitiu a construção gráfica de todo o edifício em 3D. O *REVIT* pertence à empresa *AUTODESK* e permite aos utilizadores projetar edifícios, estruturas e os seus componentes em 2D e 3D. O utilizador pode criar o seu próprio projeto 2D para modelagem, ou, como consistiu o presente caso, importá-lo diretamente de outra plataforma *CAD* como o *AutoCAD*, em formado *dwg*, *dxf*, *dgn* ou outros.

Assim foi possível a introdução dos dados de entrada do edifício, como espessura das paredes, pavimentos, cobertura, áreas, pé direito e a disposição de cada compartimento de uma maneira muito mais eficaz. É também aqui que se define se uma envolvente está em contacto com o exterior ou com o subsolo. No presente caso, o piso -1 é subterrâneo. Este processo assumiu um papel importante na introdução dos dados no *software TRACE 700* uma vez que permitiu reduzir o tempo de modelação, através da importação de um ficheiro do tipo "*.gbXML*" (proveniente do *REVIT*). As plantas dos respetivos pisos constituintes do edifício projetadas neste *software* podem ser consultadas em anexo (Anexo A), e o modelo tridimensional criado pode ser visto na Figura 29. Na Figura 30 surge a vista de cima do edifício, com as respetivas orientações de cada fachada.

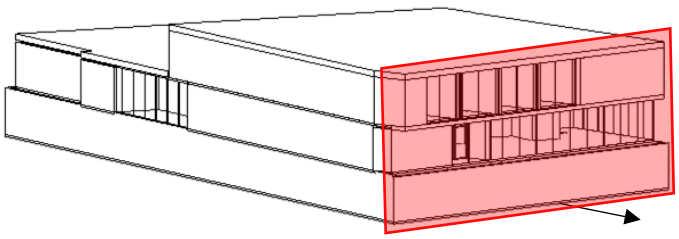


Figura 29 - Modelação em *REVIT* do edifício termal (3D).

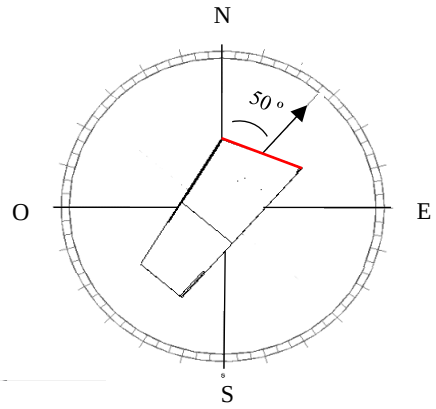


Figura 30 - Orientação do edifício em REVIT – vista de cima.

Após a importação do ficheiro no *TRACE 700*, todos os campos que dizem respeito à informação acerca das dimensões dos espaços são automaticamente preenchidos. No entanto, é ainda necessário definir cada espaço em termos construtivos, de temperaturas de funcionamento e ganhos internos (densidade de ocupação, iluminação e equipamentos). Para definir estes campos recorrem-se aos templates já criados. É ainda preciso diferenciar os espaços climatizados dos não climatizados, definir a inércia térmica do edifício já calculada, no campo "*Room mass/avg time lag"*, e ainda, introduzir a inclinação da cobertura, em "roofs". Esta mediu-se diretamente no ficheiro *AutoCAD*, como se pode observar na Figura 31, e assume um valor igual a 5º.

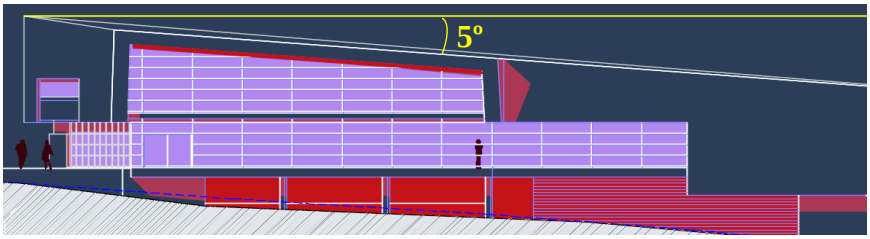


Figura 31 - Inclinação da cobertura (*AutoCAD*).

4.2.4. Modelação do espaço Piscina

As piscinas são espaços onde existem muitos equipamentos que trabalham durante 24 horas, que apresentam necessidades muito grandes a nível de ventilação e onde a necessidade de proporcionar condições de qualidade do ar e de conforto térmico aos utilizadores é obrigatória. Assim, é normal prever-se elevados consumos de energia térmica nestes espaços.

Para a modelação da piscina, criou-se um espaço chamado "piscina" com as devidas dimensões, e envolvente igual ao restante edifício. As principais dimensões da piscina surgem na Tabela 21 e as condições de projeto na Tabela 22.

Tabela 21 – Geometria da Piscina.

Parâmetros Geométricos	
Perímetro da piscina [m]	48
Superfície da piscina [m^2]	128
Profundidade [m]	1,5
Volume da piscina [m^3]	192

Tabela 22 - Condições de projeto do espaço piscina.

Condições de Projeto	
Temperatura Piscina [°C]	30
Temperatura Ar Ambiente [°C]	32
Humidade Relativa [%]	65

Para calcular o balanço térmico da piscina, foi necessário perceber qual o fator de utilização. Sendo que para diferentes tipos de piscina, surgem diferentes fatores de utilização, como se constata na Tabela 23, foi necessário encontrar aquele que mais se adequava ao presente caso. Considerando que estamos perante uma tipologia de piscina "banhos termais" foi usado o fator de atividade igual a 0,65. Quando a piscina não está a ser utilizada adotou-se um fator de atividade igual a 0,2.

Tabela 23 - Fatores de utilização em função do tipo de atividade.

Tipo de Piscina	**Fator de utilização (Fu)**
Piscinas Residenciais	0,5
Banhos Termais	0,65
Hotel	0,8
Piscinas públicas ou escolares	1

Os cálculos para as perdas da piscina, baseados nas equações de balanço térmico da norma NP 4448, foram realizados com recurso a uma folha de EXCEL, com base nos dados acima expostos. Os resultados principais, relativos às perdas da piscina por radiação, convecção e evaporação, quando esta está encerrada (Fu = 0,20) e quando se encontra em funcionamento (Fu = 0,65), surgem apresentados de seguida, na Tabela 24. Os valores apresentam-se em Watt e em Watt por m^2 de área do plano da piscina.

Tabela 24 - Contabilização das perdas da piscina do complexo Termal Fonte Santa

	Fator de utilização = 0,20		**Fator de utilização = 0,65**	
	[W]	**[W/m^2]**	**[W]**	**[W/m^2]**
Perdas Sensíveis por Radiação	2807,99	21,94	2807,99	21,94
Perdas Sensíveis por Convecção	0,01	0	0,01	0
Perdas Latentes por Evaporação	5158,76	40,30	16765,97	130,98
Total	7966,76	62,24	19573,97	152,92

Em "*Library/Template Editors*", na opção "*Internal and Airflow Loads Library*" (Figura 32), é possível modelar o equipamento da piscina, com base nos cálculos efetuados na folha de EXCEL. A percentagem de carga latente calculada é cerca de 85%, sendo a carga sensível igual a 15%. O consumo de energia do equipamento corresponde ao total das perdas no pico de utilização (19,57 kW).

$$Carga\ latente\ [\%] = \frac{Perdas\ latentes}{Total\ Perdas} \times 100 = \frac{16765{,}97}{19573{,}97} \times 100 \cong 85\ \% \quad (4)$$

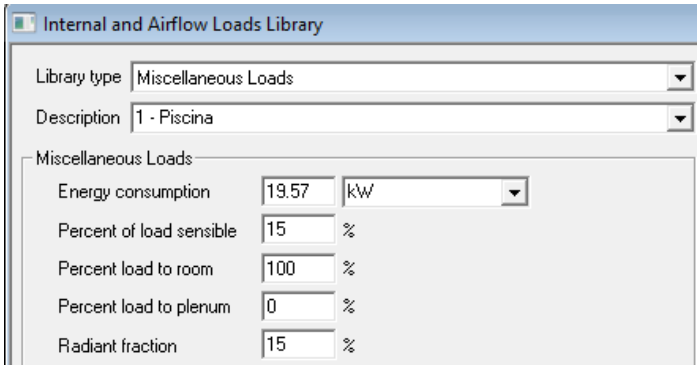


Figura 32 - Definição do equipamento "Piscina".

4.2.5. Criação dos Sistemas de Climatização ("*Create Systems*")

As unidades de tratamento de ar que permitem o aquecimento e o arrefecimento dos espaços foram modeladas como sistemas de classe *constant volume-non mixing* e do tipo *variable temperature constant volume*. Na secção relativa a "*dedicated OA*", caracteriza-se a unidade de tratamento de ar, introduzindo as temperaturas de insuflação do ar pré-tratado em aquecimento (20 °C) e em arrefecimento (25 °C). É ainda possível definir os perfis de funcionamento para as baterias de aquecimento e de arrefecimento, bem como o perfil de funcionamento do ventilador da UTA e o modo como é insuflado o ar no espaço após a passagem pela UTA, no presente caso diretamente no espaço (*room direct*).

Depois de criados todos os espaços do edifício e todos os sistemas de AVAC, é na secção "*assign rooms to systems*" que se procede à associação de cada espaço ao respetivo sistema que o serve. Esta distribuição, foi feita essencialmente segundo critérios de semelhança do tipo de utilização de cada espaço e dos equipamentos terminais de climatização, através das plantas de climatização fornecidas pelas respetivas entidades. Segundo estes critérios, criaram-se 9 (7 + 2) sistemas de climatização, cujos respetivos caudais de insuflação e as cargas térmicas simuladas no programa podem ser observadas na Tabela 25 e na Tabela 26.

Tabela 25 - Simulação dos sistemas de climatização (UTV + UTA + UDP) do complexo termal.

Sistema	***Airflow* Template**	**ARR [kW]**	**AQU [kW]**	**Ar Tratado [m^3/h]**	**Ar Novo [m^3/h]**
UTV 1	Zonas Comuns	-	19	2005	2005
UTV 2	Tratamentos	-	45	4410	4410
UTV 3	Vestiários	13	51	5324	5324
UTA 3 + VC (Repouso e ORL)	Vestiários	25	21	2174	2174
UTA 4	Entrada	30	25	5176	1199
UTV 5	Massagens	-	23	2390	2390
UDP – Desumidificação Piscina	Piscina	44.7	39	6001	1047

As duas VAN's, unidades de ventilação de ar novo, que servem os espaços relativos ao ginásio e aos escritórios, apresentam os resultados obtidos em simulação na Tabela 26.

Tabela 26 - Simulação dos sistemas de climatização (VAN's) do complexo termal.

Sistema	***Airflow Template***	**ARR [kW]**	**AQU [kw]**	**Ar Novo [m^3/h]**
VAN 5 – Ginásio	Ginásio	32	32	1612
VAN 5 – Escritórios	Escritórios	28	28	1080

Como se pode observar, os valores de caudais de insuflação simulados estão bastante semelhantes aos valores reais, enunciados no subcapítulo 3.7.2. na Tabela 17, bem como os as potências de aquecimento e arrefecimento de cada sistema.

O dimensionamento eficiente de um sistema ativo de climatização depende da correta caracterização das cargas térmicas internas e externas. Apesar de existirem pequenos desvios em relação a alguns valores reais, é possível afirmar que os sistemas de climatização bem como os espaços que servem, se encontram satisfatoriamente modelados.

4.2.6. Criação das Plantas ("Create Plants")

Na secção "*create plants*" caracterizam-se os equipamentos que servem os sistemas AVAC presentes no edifício. Assim, modelaram-se duas plantas: uma para o arrefecimento, constituída por um chiller de condensação a ar, e uma para o aquecimento, que consiste em duas caldeiras de gás natural. Estes equipamentos encontram-se caracterizados no subcapítulo 3.8.2., e a sua modelação pode ser observada na Figura 33: à esquerda caracteriza-se o equipamento chiller e à direita, a caldeira. Para além das especificidades técnicas destes equipamentos, são também introduzidas as bombas de circulação de água, especificando as respetivas perdas de carga.

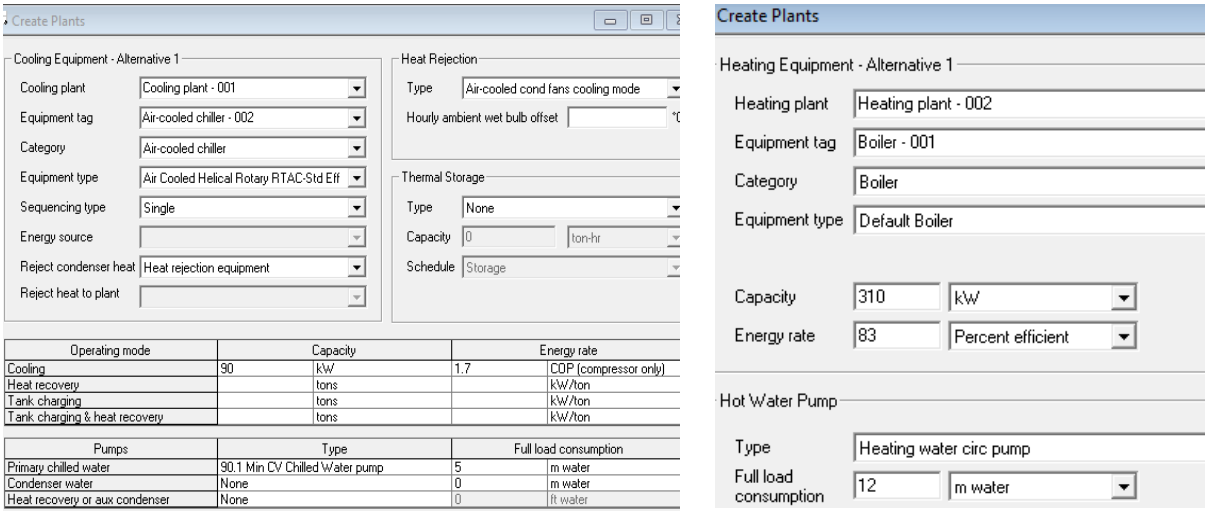


Figura 33 - Modelação dos equipamentos de produção de energia do edifício: produção de frio (à esquerda) e produção de quente (à direita).

De notar que foram usadas eficiências mais reduzidas que as que constam na memória descritiva, tanto para a caldeira como para o chiller, por não se ter conhecimento do estado em que se encontram os equipamentos. Assim, adotou-se para o chiller um COP de 1,7 e para a caldeira um rendimento de 83%, assumindo a idade dos equipamentos superior a 10 anos. Estes valores foram assumidos tendo com base a nota técnica NT-SCE-01, segundo a tabela do quadro XII: "Valores de referência da eficiência dos equipamentos de climatização e de produção de AQS" [41].

Em *"base utility/misc. Acessory"* definem-se os equipamentos que têm usos significativos de energia no edifício, mas que não podem ser enquadrados de outra forma no programa. Aqui foi definido o consumo relativo ao caudal de renovação da piscina e o consumo de água quente sanitária, ambos a consumir energia térmica da caldeira.

Os processos de filtração e desinfeção não conseguem remover todos os poluentes da água das piscinas, sendo necessário proceder à sua renovação. A percentagem diária de renovação deverá ser da ordem dos 5% do volume da água piscina. Sendo o volume total igual a 192 m^3, isto traduz-se num caudal de renovação igual a 9,6 m^3/dia. No entanto, no presente caso usou-se um caudal de renovação superior, correspondente a 12,5% do volume da piscina, por se tratar de águas termais e o cuidado a ter, ser maior. Assim, o caudal adotado corresponde a aproximadamente 24 m^3/dia (≅ 0,28 L/s), a funcionar o ano inteiro.

Para o cálculo das necessidades de AQS, considerou-se a utilização do edifício apenas nos meses de maio a novembro, em que o complexo termal se encontra aberto, logo o número anual de dias de consumo foi contabilizado em 175 dias. Segundo o levantamento dos consumos efetuado no subcapítulo 3.9, foi possível efetuar os cálculos para o consumo de AQS, sendo que o perfil de utilização usado para efeitos de simulação foi já enunciado e encontra-se no anexo G. Segundo os dados fornecidos pela ADENE, sabe-se que o consumo total no edifício Termal é de 1075L/h, o que corresponde a um total de, aproximadamente, 0,30L/s. Estes dois consumos foram modelados a consumir energia térmica da caldeira e podem ser observados na Figura 34.

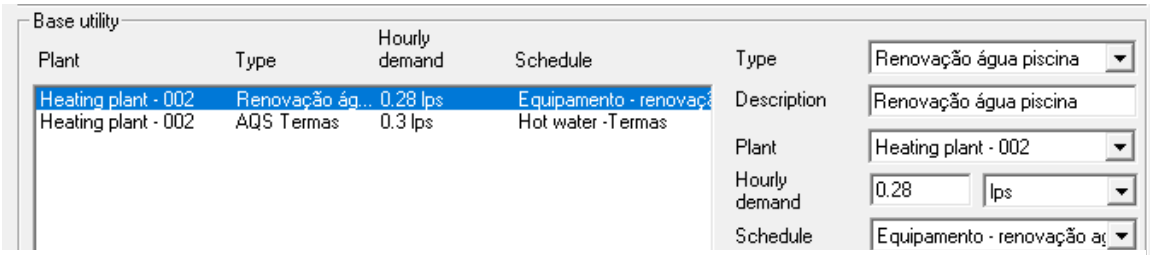


Figura 34 - Modelação dos consumos relativos à renovação de água da piscina e AQS.

Depois de criadas as plantas para produção de frio e calor, associam-se aos sistemas AVAC que vão servir, na secção "*assign systems to plants"*.

4.2.7. Definir a Economia ("*Define Economics*")

Por último, na secção "*Define economics*" é possível realizar uma análise económica dos consumos energéticos inerentes ao edifício. Para tal, é imprescindível conhecer-se os preços praticados de eletricidade e gás pelas respetivas empresas especializadas: EDP e GALP.

4.2.7.1. Tarifário elétrico

A EDP universal é a entidade que pratica os preços no mercado regulado, ou seja, os preços definidos pela ERSE (Entidade Reguladora de Serviços Energéticos). Optou-se por utilizar estes valores por serem considerados de referência do mercado e por não existir qualquer indicação relativa ao operador de fornecimento de energia elétrica. Os seus horários e preços, surgem representados na Tabela 27, os quais foram devidamente introduzidos no *software*, em "*rate structure library*".

Considerou-se uma tarifa de média tensão, uma vez que se trata de um edifício termal, o que pode ser considerado como "hotelaria". Foi usado o horário de Verão, devido ao pico de funcionamento do edifício, ocorrer nesta época. O preço da energia ativa foi o tabelado para longas utilizações [42].

Tabela 27 - Tarifário Elétrico EDP [42].

Termo tarifário fixo	46,07 €/mês

Preços da potência [€/kW.dia]		
Tarifa de longas utilizações	horas de ponta	contratada
	0,3316	0,0508

Período	**Hora**		**Preço do kWh (€/kWh)**	
	Verão	**Inverno**	**I e IV***	**II e III***
Ponta	Das 10:30 h às 12:30 h Das 20:00 h às 22:00 h	Das 09:30 h às 11:30 h Das 19:00 h às 21:00 h	0,1382	0,1408
Cheias	Das 09:00 h às 10:30 h Das 12:30 h às 20:00 h Das 22:00 h às 23:00 h	Das 08:00 h às 09:30 h Das 11:30 h às 19:00 h Das 21:00 h às 22:00 h	0,1101	0,1124
Vazio Normal	Das 23:00 h às 02:00 h Das 06:00 h às 09:00 h	Das 22:00 h às 02:00 h Das 06:00 h às 08:00 h	0,0777	0,0791
Super Vazio	Das 02:00 h às 06:00 h	Das 02:00 h às 06:00 h	0,0666	0,0728

* - Trimestres do ano

4.2.7.2. Tarifário Gás Natural

Por sua vez, os preços do gás natural, foram obtidos com recurso à GALP. A empresa concessionária para distribuição de gás natural em Almeida é a Beiragás – Companhia de gás das Beiras, S.A. Atualmente os escalões tarifários do consumo de gás natural diferenciam-se de acordo com o volume consumido anualmente. Para se obter o consumo faturado em m^3 a partir de kWh de gás natural é necessário aplicar um fator de conversão, calculado pela seguinte fórmula:

$$Fator\ de\ Conversão\ (m^3\ para\ kWh) = PCS \times Fct \times Fcp \quad (5)$$

Em que,

PCS (Poder Calorifico Superior – Gás Natural) = 11,9 kWh/m^3 (características do gás natural de referência distribuído em Portugal);

F_{ct} (Fator de correção por temperatura) = 0,961288 (Beiragás);

F_{cp} (Fator de correção por pressão) = 1,098692 [43].

Assim, usando o devido fator de conversão com os valores obtidos, o consumo anual do edifício em estudo é igual a, aproximadamente, 38737 m^3/ano.

Nos casos em que o consumo anual ultrapassa os 10000 m^3/ano, como é o presente caso, o cliente é considerado não doméstico ou industrial, pelo que o contrato a celebrar, por requerer um tarifário personalizado, deve ser negociado diretamente com a Galp. Por falta de informação relativa ao tarifário de gás, considerou-se a tarifa média apresentada com a fatura fornecida na memória descritiva e justificativa de dezembro de 2018, que corresponde a 0,098 €/kWh, equivalente a 0,027 €/MJ.

4.2.8. Cálculo dos Resultados (“*Calculate and View Results*”)

Após concluídas todas as fases que resultaram na criação do modelo do edifício, é possível proceder à sua simulação. Antes disto, é necessário afinar os parâmetros de carga e de energia. Nos parâmetros de carga define-se a orientação do edifício, e o tipo de terreno onde se insere (área rural). Por sua vez, nos parâmetros de energia define-se as horas de simulação (*full year*) e o calendário anual adequado ao funcionamento do edifício (Calendário Termas Fonte Santa), representado na Figura 35.

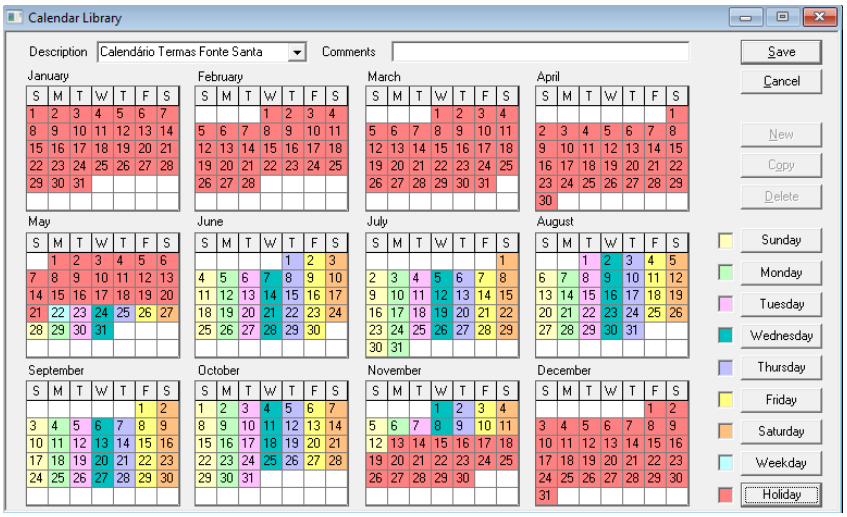


Figura 35 - Calendário de funcionamento do edificio "Termas de Fonte Santa".

4.3 Resultados

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados principais provenientes da simulação dinâmica, relativos ao consumo energético do edifício, por equipamentos. Dentro dos possíveis, fizeram-se as devidas comparações com os registos do consumo energético decorrentes da leitura das faturas existentes, para verificar o nível de calibração da simulação. Após isto, foi realizada uma análise energética completa ao complexo termal, permitindo saber quais são os equipamentos que detêm um maior peso no consumo energético do mesmo. É ainda feita a análise económica com o objetivo de comparar os custos de cada forma de energia.

4.3.1. Necessidades Térmicas de Arrefecimento (Consumo Eletricidade)

Os resultados para o arrefecimento apresentam-se na Figura 36, que ilustra a comparação entre o consumo elétrico mensal simulado (simulação, cor de laranja) e o consumo proveniente da fatura do ano de 2017 (real, cor azul). A mesma pode ser consultada no anexo I.

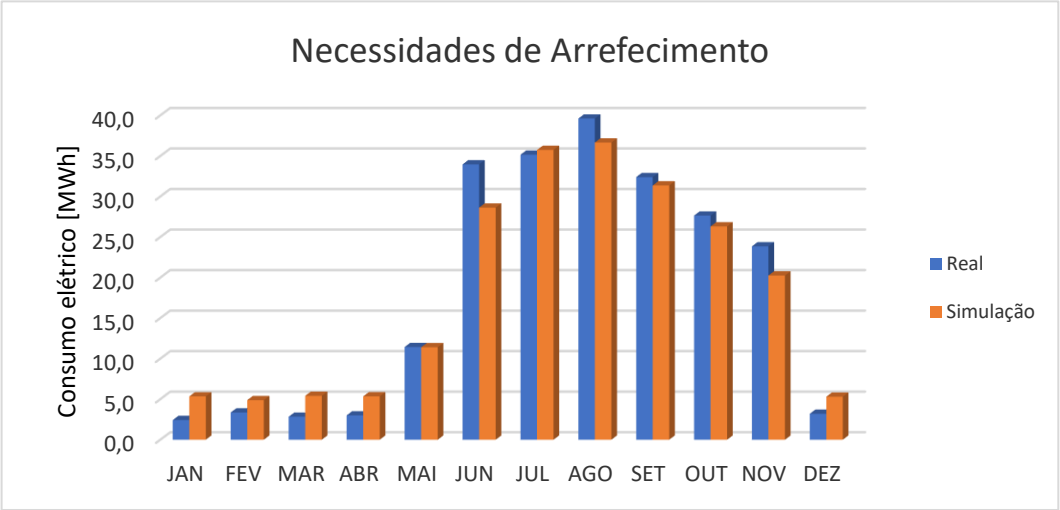


Figura 36 - Necessidades Térmicas de Arrefecimento.

Constata-se um sobredimensionamento relativamente ao consumo real do edifício, nos meses em que o complexo termal está encerrado. Por sua vez no mês de junho surge um subdimensionamento. O consumo de energia elétrica, simulado para o complexo termal, é aproximadamente 216,63 MWh_{elec}/ano e o consumo elétrico relativo à fatura energética do ano 2017 (fornecida pelo certificado energético da ADENE, anexo I) corresponde a 218,84 MWh_{elec}/ano. Assim, e após várias simulações realizadas, é possível afirmar que o resultado final relativo às necessidades elétricas simuladas é bastante satisfatório, apresentando um desvio anual de -1% em relação às necessidades reais do edifício no ano 2017.

4.3.2. Necessidades Térmicas de Aquecimento (Consumo Gás Natural)

No caso do consumo de gás natural, foi impossível a sua comparação com a realidade, uma vez que a única fatura existente se encontrava bastante desfasada, não havendo perceção do consumo mensal, mas apenas anual. A mesma fatura (ano 2017) pode ser encontrada também no anexo I, e as necessidades térmicas de aquecimento do complexo termal surgem apresentadas na Figura 37.

Os resultados relativos às necessidades de aquecimento global (aquecimento ambiente, AQS e piscina) apresentam-se elevados todo o ano, uma vez que existem equipamentos alimentados pela caldeira, que estão constantemente ligados, nomeadamente o equipamento de renovação de água da piscina e a unidade relativa ao tratamento ambiente da piscina (desumidificação). No mês de novembro é quando se observa o pico de aquecimento do edifício.

O consumo de gás simulados para o edifício é 486,84 MWh_{gas}/ano, sendo o consumo de gás relativo à fatura energética do ano 2017 correspondente a 486,86 MWh_{gas}/ano (valores no anexo I). Assim, as necessidades de aquecimento simuladas apresentam um desvio anual das necessidades reais do edifício de 0%.

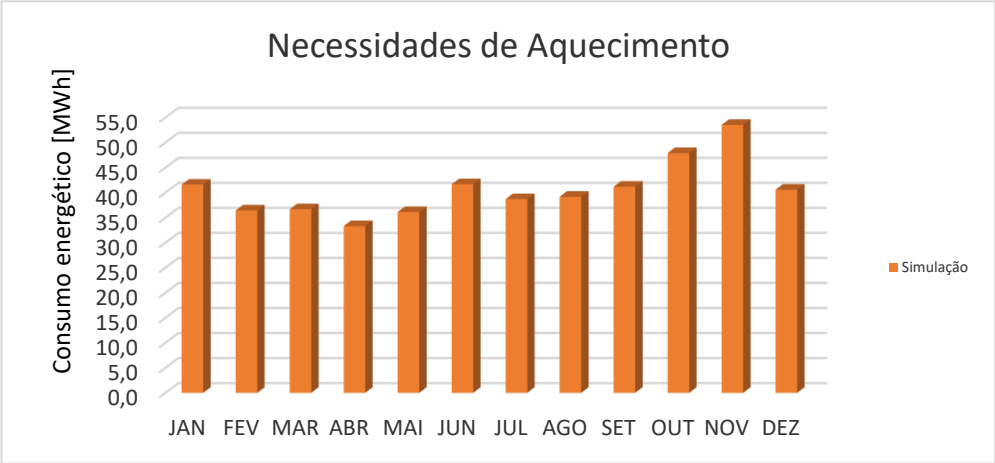


Figura 37 - Necessidades Térmicas de Aquecimento.

4.3.3. Incerteza na Modelação

Após simulação do comportamento do edifício, foi necessário proceder à sua validação. Os consumos de energia elétrica e de gás simulados, para garantir as necessidades globais do edifício são, respetivamente, 216,63 MWh_{elec}/ano e 486,84 MWh_{gas}/ano, sendo as necessidades globais de 703,47 MWh/ano. Assim, conclui-se que os erros obtidos foram respetivamente, 1%, para a simulação do consumo elétrico e 0%, para a simulação do gás natural, como já foi enunciado anteriormente [44].

Recorreu-se também a dois índices que constam da *Standard 209P* da *ASHRAE* "*Energy Simulation Aided Design for Buildings except Low-Rise Residential Buildings*", que ditam o quão bem representado se encontra um modelo de simulação, comparativamente ao modelo real. Assim, é calculado o NMBE (normalized mean bias error), e o CVRMSE (Coefficient of Variation of the Room Mean Square Error), que segundo a *ASHRAE guideline* 14 se calculam através das seguintes equações [45, 46]:

$$NMBE = 100 \times \frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)}{(n-1) \times \bar{y}} \tag{6}$$

$$CVRSME = 100 \times \frac{\left[\frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}\right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{y}} \tag{7}$$

Onde:

- y_i = energia medida em cada mês;
- $\hat{y}_i$ = energia simulada em cada mês;
- $\bar{y}$ = média aritmética da energia medida mês a mês;
- i = intervalo em que a energia medida e a simulada estão a ser comparadas (mensalmente);
- n = número de intervalos da análise (12).

Na Tabela 28 apresentam-se os resultados obtidos, apenas para o consumo elétrico, bem como os limites máximos destes coeficientes, impostos pela norma referida. Assim, a simulação referente ao consumo elétrico pode considerar-se calibrada de acordo com o comportamento real do edifício, uma vez que os valores obtidos se encontram dentro dos intervalos previstos.

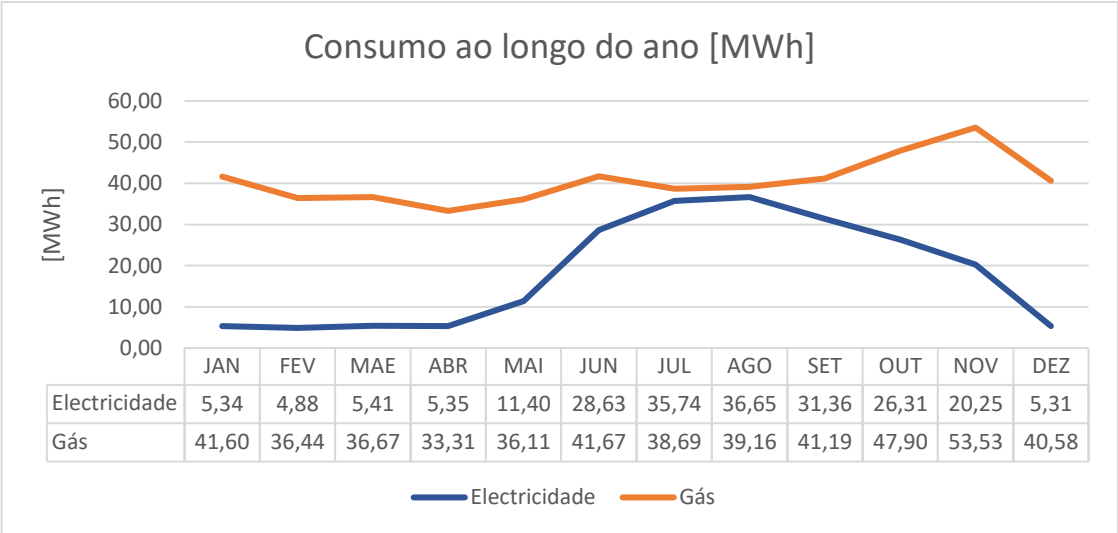
Tabela 28 - Limites dos coeficientes NMBE e CVRSME e valores obtidos da simulação.

	Valor obtido [%]	Limites [%]
NMBE	1,10	±5
CVRSME	3,66	15

No caso do consumo de gás natural, não foi possível aplicar a norma da *ASHRAE*, por não haver informação disponível sobre os consumos mensais de gás mas, uma vez que o consumo elétrico se encontra normalizado e de acordo com a fatura real, assumiu-se que o consumo de gás não poderia apresentar grandes desvios. No entanto, convém salientar que as análises efetuadas baseiam-se apenas nos dados das faturas relativas ao ano de 2017, não sendo por isso muito representativas.

4.3.4. Caracterização energética da solução existente

Após calibrado o modelo, é possível fazer a análise energética do edifício. Na Figura 38 observam-se em simultâneo as variações do consumo de energia elétrica e de gás natural, para garantir as necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento do edifício Termal Fonte Santa, ao longo do ano. Constata-se que o consumo para as necessidades de aquecimento (69%) é consideravelmente superior ao consumo para satisfazer as necessidades de arrefecimento (31%). Nos meses em que o edifício está encerrado os consumos de eletricidade são residuais, enquanto que nos meses de julho e agosto estes consumos atingem o seu pico, por se tratar de meses bastante quentes e com necessidades de arrefecimento. As necessidades de aquecimento apresentam-se elevadas o ano inteiro, principalmente por causa do equipamento da renovação da água da piscina que está constantemente a trabalhar.



	JAN	FEV	MAE	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Electricidade	5,34	4,88	5,41	5,35	11,40	28,63	35,74	36,65	31,36	26,31	20,25	5,31
Gás	41,60	36,44	36,67	33,31	36,11	41,67	38,69	39,16	41,19	47,90	53,53	40,58

Figura 38 - Consumo de eletricidade e gás [MWh] do edifício termal ao longo do ano.

Os resultados dos consumos energéticos anuais, relativos ao edifício em estudo, foram desagregados por vetor de utilização, de modo a avaliar o consumo energético afeto a cada sistema/equipamento, e podem ser consultados na Tabela 29. O relatório dos resultados aqui expostos, gerado pelo programa *TRACE 700*, pode ser visto no anexo J.

Tabela 29 - Desagregação dos consumos energéticos anuais por utilização final.

Energia Consumida	Gás [MWh/ano]	Eletricidade [MWh/ano]	*Purchased hot water* [MWh/ano]	Consumo Energético [MWh/ano]
Aquecimento	168,27	15,74		184,01
Arrefecimento		63,57		63,57
Ventilação		36,31		36,31
Bombas		14,85		14,85
Iluminação		44,97		44,97
Equipamentos		41,19		41,19
AQS	58,57			58,57
Renovação Piscina+Tratamentos	247,24			247,24
Tratamento ambiente Piscina	12,76		89,45	102,21
Total	486,84	216,63	89,45	792,92

Do gráfico apresentado na Figura 39 é possível ter uma noção relativamente aos grandes consumidores de energia térmica no edifício. Destacam-se os consumos da piscina, que representa 44% do consumo anual de energia do edifício, e os consumos dos sistemas AVAC (aquecimento, arrefecimento, ventiladores associados à climatização e bombas), principalmente ao nível do aquecimento, devendo as medidas de racionalização energética ter um papel mais preponderante nestes sistemas.

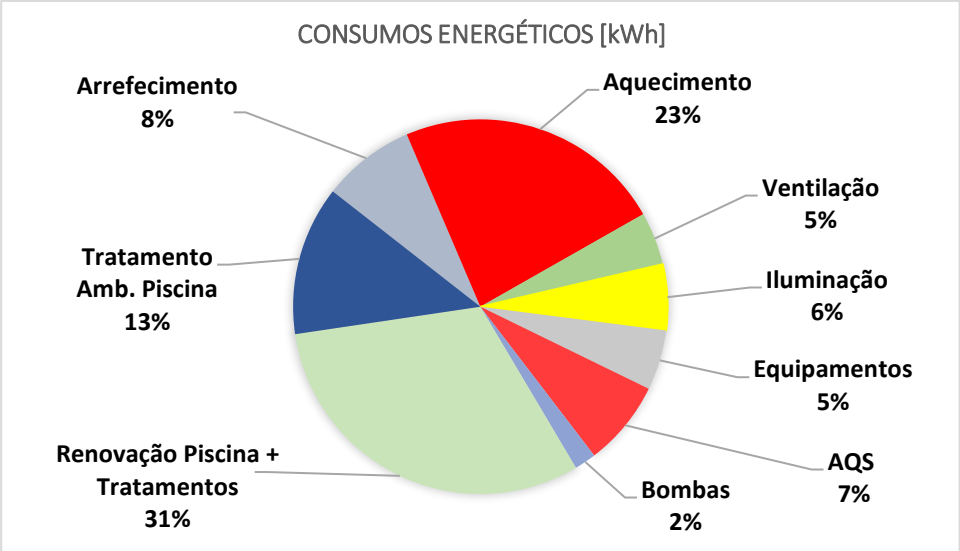


Figura 39 - Desagregação dos consumos energéticos por utilização final.

4.3.5. Emissões de CO_2

Com o conhecimento do consumo de energia elétrica e de gás natural é possível determinar as emissões de dióxido de carbono equivalentes do edifício. Para isso é necessário efetuar a conversão da energia final comprada (energia elétrica e gás natural) em energia primária, utilizando os fatores de conversão presentes na legislação portuguesa.

Estes fatores de conversão são, de acordo com a legislação nacional (despacho 15793-D/2013), de 2,5 kWh_{EP}/kWh para eletricidade, independente da origem (renovável ou não renovável), e de 1 kWh_{EP}/kWh para todos os combustíveis sólidos, líquidos e gasosos não renováveis. Na determinação das emissões de dióxido de carbono associadas ao consumo de energia nos edifícios, os fatores de conversão de energia primária para emissões de CO_2 apresentam-se na Tabela 30 [47].

Tabela 30 - Fatores de conversão das emissões de CO_2 [47].

Fonte de Energia	Fator de Conversão (kgCO_2/kWh_{EP})
Eletricidade	0,144
Gás Natural	0,202

Assim, fazendo as devidas conversões, os resultados obtidos surgem na Tabela 31, sendo que se registou uma libertação de 176,33 tCO_2 por ano, do complexo termal.

Tabela 31 - Emissões de dióxido de carbono em 2017.

	Energia Final [MWh]	Energia Primária [MWh_{EP}]	Emissões de Dióxido de Carbono (tCO_2)	Total emissões (tCO_2)
Eletricidade	216,63	541,57	77,99	176,33
Gás Natural	486,84	486,84	98,34	

4.3.6. Indicador de Eficiência Energética Efetivo do edifício

A certificação energética promove a melhoria da eficiência energética dos edifícios, definindo requisitos de conforto térmico e de eficiência dos sistemas de climatização de acordo com a sua utilização. De acordo com o estabelecido no Decreto-Lei 118/2013 de 20 de agosto, os edifícios ou frações de comércio e serviços devem afixar os certificados energéticos em posição visível e de destaque. Esta obrigação recai sobre edifícios que apresentem uma área útil de pavimento superior a 500 m^2 ou, a partir de 1 de julho de 2015, superior a 250 m^2, como se trata o presente estudo. [40]

O desempenho energético de um edifício de comércio e serviços é aferido pela determinação do seu indicador de eficiência energética (IEE). O IEE efetivo (IEE_{ef}) traduz o consumo anual de energia do edifício, obtido no histórico de faturas e/ou considerando os resultados de uma avaliação energética realizado numa base de tempo anual.

Assim, a determinação do IEE_{ef} encontra-se na Tabela 32, tendo-se obtido um valor de 460 kWh_{EP}/m^2.ano para o complexo termal, sabendo que a área útil de pavimento é igual a 2247 m^2 [48].

Tabela 32 - Cálculo do IEE_{ef}.

	Energia Final [kWh]	**Energia Primária [kWh_{EP}]**	**Total [kWh_{EP}]**	**IEE_{ef} [kWh_{EP}/m^2]**
Eletricidade	218 842	547 105	1 033 945	460
Gás Natural	486 860	486 840		

4.3.7. Análise Económica

Nos seguintes gráficos apresenta-se a distribuição dos consumos de energia útil de eletricidade e gás (Figura 40), bem como os respetivos custos associados a esses consumos (Figura 41). Os custos globais de energia traduzem-se em 78 781 €/ano.

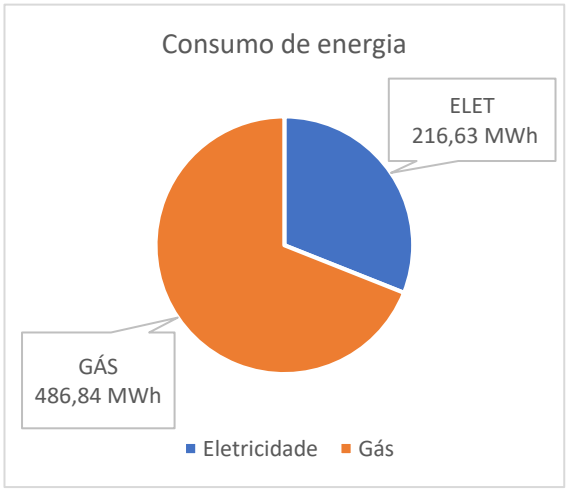


Figura 40 - Consumo anual de energia [MWh]

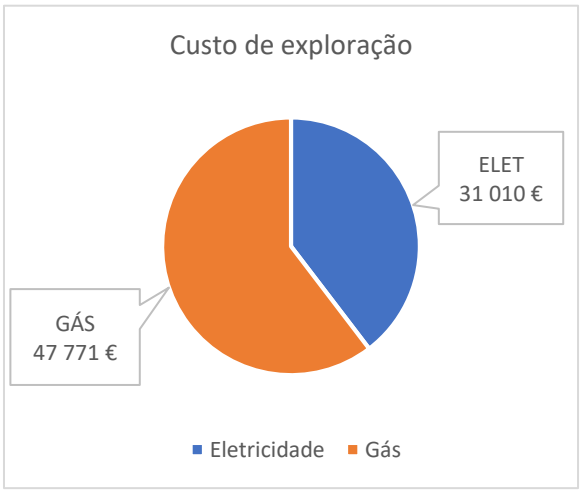


Figura 41 - Custo anual de exploração de energia [€]

Com base nos gráficos é possível saber o preço médio por kWh de energia, que irá de acordo aqueles que foram enunciados no subcapítulo 4.2.7. Assim, os valores correspondentes são respetivamente 0,098 €/kWh para o gás natural e 0,14 €/kWh para a eletricidade.

5 Soluções Propostas para aumento de eficiência energética

No local existe disponibilidade para a implementação de uma solução de energia geotérmica renovável, sendo a mesma já utilizada para os tratamentos termais. A temperatura desta água proveniente do furo da geotermia apresenta uma temperatura média de 30 °C. A temperatura máxima registada em Almeida até hoje foi 35 °C, apresentada na Tabela 33. É objetivo deste projeto aproveitar o máximo potencial renovável (geotérmico), através da implementação de sistemas/equipamentos adequados.

Tabela 33 - Características da ocorrência geotérmica em Almeida [1].

Local Térmico	Temp. Máx. [°C]	Temp. Média [°C]	Quimismo
Almeida	35	30	Sulfúrea, Bicarbonatada, Sódica

A implementação de uma solução geotérmica de baixa entalpia (ou baixa temperatura), como bombas de calor geotérmicas, revela um grande potencial renovável. Apesar de apresentar custos de implementação consideráveis, os retornos de investimentos são muito interessantes.

Assim, e uma vez que no local já se faz o aproveitamento das águas geotérmicas para os tratamentos termais, o principal objetivo centrou-se em avaliar o reaproveitamento deste recurso para realizar a climatização do edifício, através da análise de bombas de calor geotérmico. Como já foi dito, as bombas de calor geotérmico são equipamentos de produção de água quente e arrefecida que utilizam a temperatura do solo para evaporação ou condensação, em função do ciclo de aproveitamento térmico. Este sistema aproveita as temperaturas do solo para aumentar a eficiência dos equipamentos de produção de energia térmica e reduzir os consumos de energia.

A redução da diferença de temperaturas entre a fonte fria e a fonte quente influencia de forma significativa o COP, reduzindo o trabalho do compressor. Para além disso, e o equipamento pode ser instalado no interior do edifício, garantido assim uma maior longevidade do mesmo. Sendo a temperatura média do recurso geotérmico existente de 30 °C, a eficiência do chiller apresenta um funcionamento mais estável. Um sistema de refrigeração com um condensador arrefecido a água, funciona de forma mais eficiente do que um sistema com um condensador arrefecido a ar. Apesar dos custos de implementação consideráveis, esta tecnologia apresenta retornos de investimento favoráveis e poupanças nas emissões de $\mathbf{CO_2}$.

Neste capítulo, serão avaliadas três medidas de melhoria de eficiência energética, com o intuito de reaproveitar o recurso geotérmico existente para diminuir os consumos energéticos anuais e, consequentemente, as emissões de gases com efeito de estufa (CO_2). Cada solução será devidamente analisada com recurso à simulação, e sustentada por uma análise energética e económica em comparação à solução convencional (caldeira a gás natural+ chiller de condensação a ar) analisada no capítulo

anterior. A solução A, servirá apenas para garantir o arrefecimento, sendo para tal, implementado um chiller de condensação a água, cuja condensação é rejeitada para a geotermia. Na solução B, implementa-se um chiller/bomba de calor de condensação a água com recuperação total do calor em ambos os ciclos, para satisfazer as necessidades de aquecimento e arrefecimento, aproveitando também o recurso geotérmico disponível. Por fim, a solução C consiste na implementação de um sistema fotovoltaico com o objetivo de otimizar o consumo de eletricidade do edifício. O sistema fotovoltaico irá ser implementado na solução B, de forma a otimizar o consumo anual do complexo termal, uma vez que a solução B foi aquela que revelou uma maior redução dos consumos energéticos.

5.1 Solução A - Chiller de condensação a água em modo de arrefecimento a rejeitar a condensação para a geotermia

5.1.1. Diagrama de Princípio e Modo de funcionamento

Na solução A, foi analisada a implementação de um chiller de condensação a água de modo a satisfazer apenas as necessidades de arrefecimento do edifício, rejeitando a condensação para a geotermia através de um permutador de calor. Para proceder ao dimensionamento do novo chiller, de forma a ser possível a sua seleção, recorreu-se, em primeiro lugar, à análise das necessidades de arrefecimento, bem como a sua solicitação ao longo do ano em função da real utilização do edifício (provado no subcapítulo 4.3.3. Calibração), como se pode ver na Figura 42.

Percent Design Load	---- Cooling Load ---- Cap. (kW)	Hours (%)	Hours
0 - 5	8.6	37	1 475
5 - 10	17.3	18	730
10 - 15	25.9	6	239
15 - 20	34.6	5	180
20 - 25	43.2	3	131
25 - 30	51.8	3	124
30 - 35	60.5	3	125
35 - 40	69.1	4	140
40 - 45	77.8	5	215
45 - 50	86.4	5	185
50 - 55	95.1	4	154
55 - 60	103.7	3	102
60 - 65	112.3	2	72
65 - 70	121.0	1	53
70 - 75	129.6	1	37
75 - 80	138.3	0	17
80 - 85	146.9	0	6
85 - 90	155.5	0	0
90 - 95	164.2	0	0
95 - 100	172.8	0	0
Hours Off	0.0	0	4 775

Figura 42 – Solicitação das necessidades de arrefecimento ao longo do ano em função da real utilização do edifício

Para 65-70% de capacidade do chiller, é possível garantir 98% das necessidades de frio do edifício, sendo a capacidade do chiller necessária igual a 121,0 kW. No projeto base está instalada um chiller com potência de arrefecimento de 90 kW, como já foi referido anteriormente. Com base nestes valores, o chiller selecionado para esta solução apresenta uma capacidade de arrefecimento de 115 kW e um COP igual a 4.

A seleção deste chiller, indica uma potência de condensação que vai ser rejeitada de 140 kW. Para ser possível a rejeição desta quantidade de calor para o anel geotérmico, o qual apresenta uma temperatura de 30 °C, e do qual existe um caudal de 12 m^3/h, é necessário um ΔT de 10 °C do lado da condensação. A temperatura do lado do condensador tem de ser 5 °C mais elevada que a geotermia, para ser possível a permuta. No lado da evaporação, as temperaturas de ida/retorno serão 7/12 °C (sendo ΔT igual a 5 °C e a potência de arrefecimento necessária para satisfazer as necessidades do edifício igual a 115,0 kW, o caudal necessário na bomba circuladora do primário do chiller é de 20 m^3/h). Assim, a seleção do chiller foi realizada para uma temperatura do chiller de ida/retorno igual a 7/12 °C, no lado da evaporação, e 45/35 °C no lado da condensação.

O diagrama de princípio relativo a esta solução, pode ser observado na Figura 43.

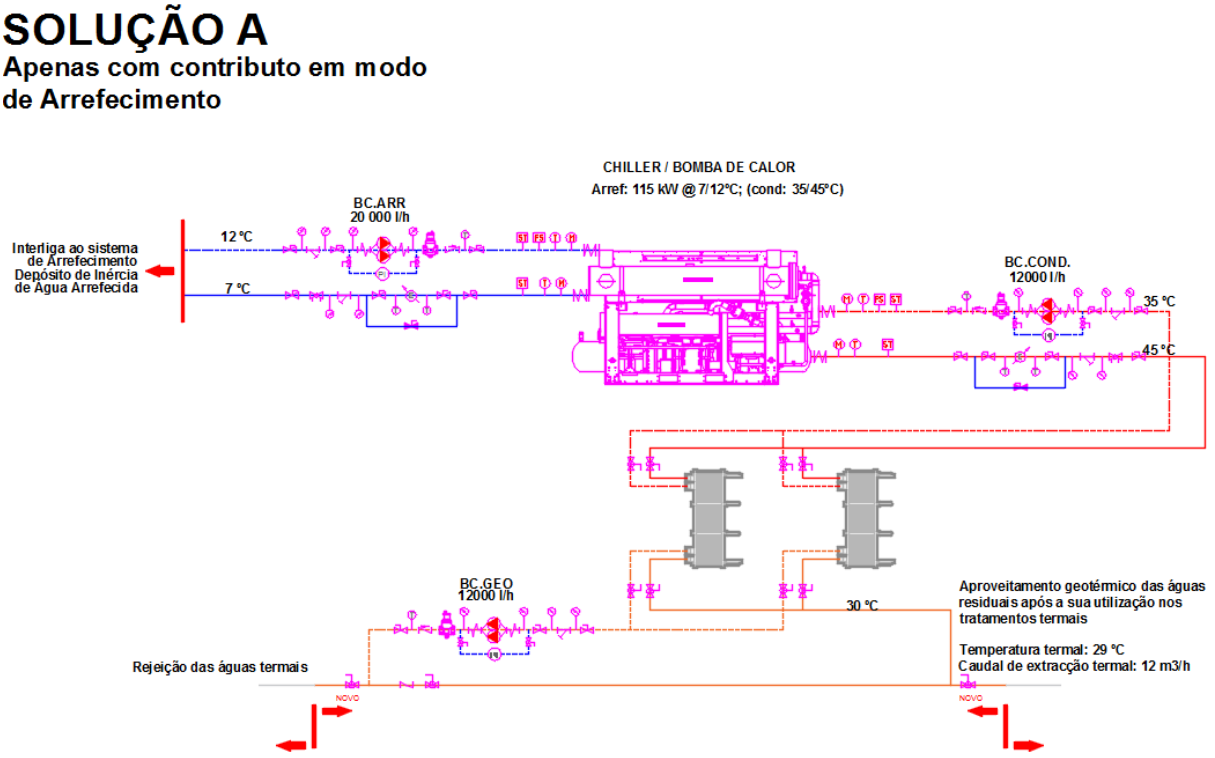


Figura 43 - Diagrama de princípio - solução A (modo de arrefecimento).

Para a implementação desta solução é necessária a utilização de permutadores de calor, responsáveis pela troca de calor entre o edifício e o anel geotérmico. Na instalação, prevê-se a utilização de dois permutadores, estando só um em utilização, sendo o outro uma reserva para quando o primeiro estiver colmatado.

No dimensionamento dos permutadores, foram tidos em conta vários aspetos. Primeiro, pretendeu-se a perda de carga mínima, que nas seleções obtidas, correspondia a 30 kPa (≅3 mca). Existe no local um furo geotérmico devidamente licenciado pela DGEG para extração de um caudal de 12 m^3/h para a utilização em tratamentos termais, sendo necessário a escolha de um permutador dimensionado para este valor de caudal. Por fim, o dimensionamento dos permutadores foi feito tendo em conta as temperaturas do lado da condensação: 45 °C (ida) e 35°C (retorno), e ainda a temperatura de entrada no permutador do lado da geotermia (30 °C). A solução que cumpria os requisitos técnicos necessários foi o permutador de placas soldadas, modelo CB110-64H, da *Alfa Laval*. Optou-se pela perda de carga

menor, pois apesar de o preço ser um pouco mais elevado este se acaba por se abater em menos perdas ao longo dos anos. O modelo pertence à *Alfa Laval* e a folha técnica relativa ao permutador selecionado encontra-se no anexo K, juntamento com o seu custo.

5.1.2. Modelação Dinâmica

Na modelação desta alternativa, no programa definida como alternativa 2, representada na Figura 44, mantiveram-se todos os dados relativos ao clima, espaços e sistemas da solução já existente, sendo que apenas se interveio ao nível das plantas de produção de energia térmica, neste caso, apenas ao nível da planta de arrefecimento. Introduziram-se os dados necessários à sua modelação: potência de arrefecimento e COP, e ainda a bomba de circulação do primário.

		Alternative 1	Alternative 2
	Enter Project Information	1ª versão edificio termal	geotermia condensação chiller modo frio
	Select Weather Information	PT_Almeida_EPW_FSG	PT_Almeida_EPW_FSG
	Create Templates	35 Templates	Use Alternative 1
	Create Rooms	52 Rooms	Use Alternative 1
	Create Systems	9 Systems	Use Alternative 1
	Assign Rooms to Systems	52 Assigned Rooms	52 Assigned Rooms
	Create Plants	3 Plants	3 Plants Based on Alternative 1

Figura 44 - Modelação das alternativas 1 e 2

Em "reject condenser heat", definiu-se o lugar para onde seria rejeitada a condensação, neste caso, para o anel geotérmico. Assim, criou-se um horário para a geotermia com disponibilidade a 100% a 30 °C durante todo o ano (*full year*), como se pode ver na Figura 45. Após isto em "*controls*" definiu-se o anel geotérmico (*geothermal loop*).

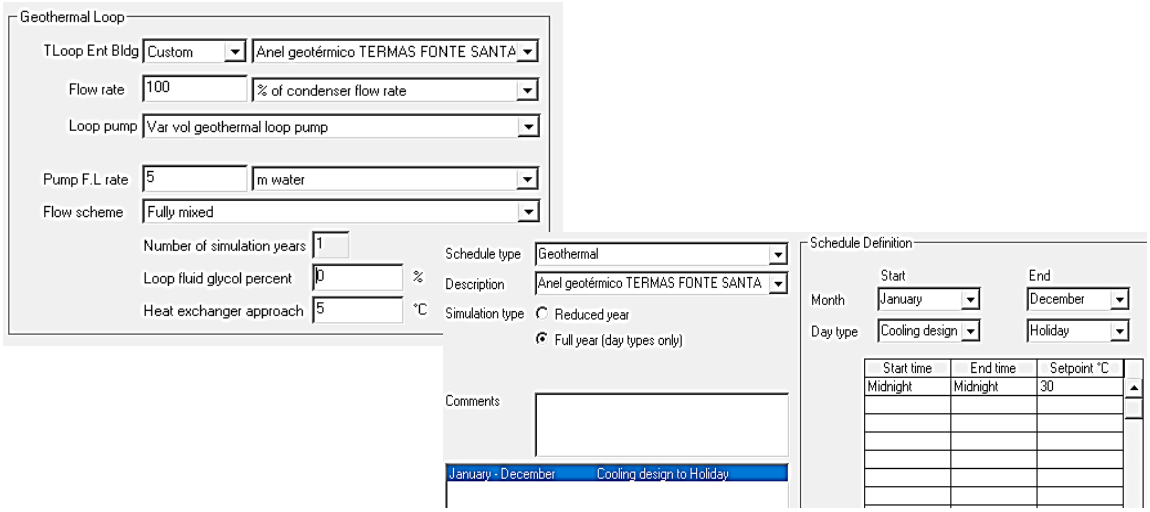


Figura 45 - Modelação do anel geotérmico.

Sendo o "*heat exchanger approach"* igual a:

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})} \cong 5\ °C$$

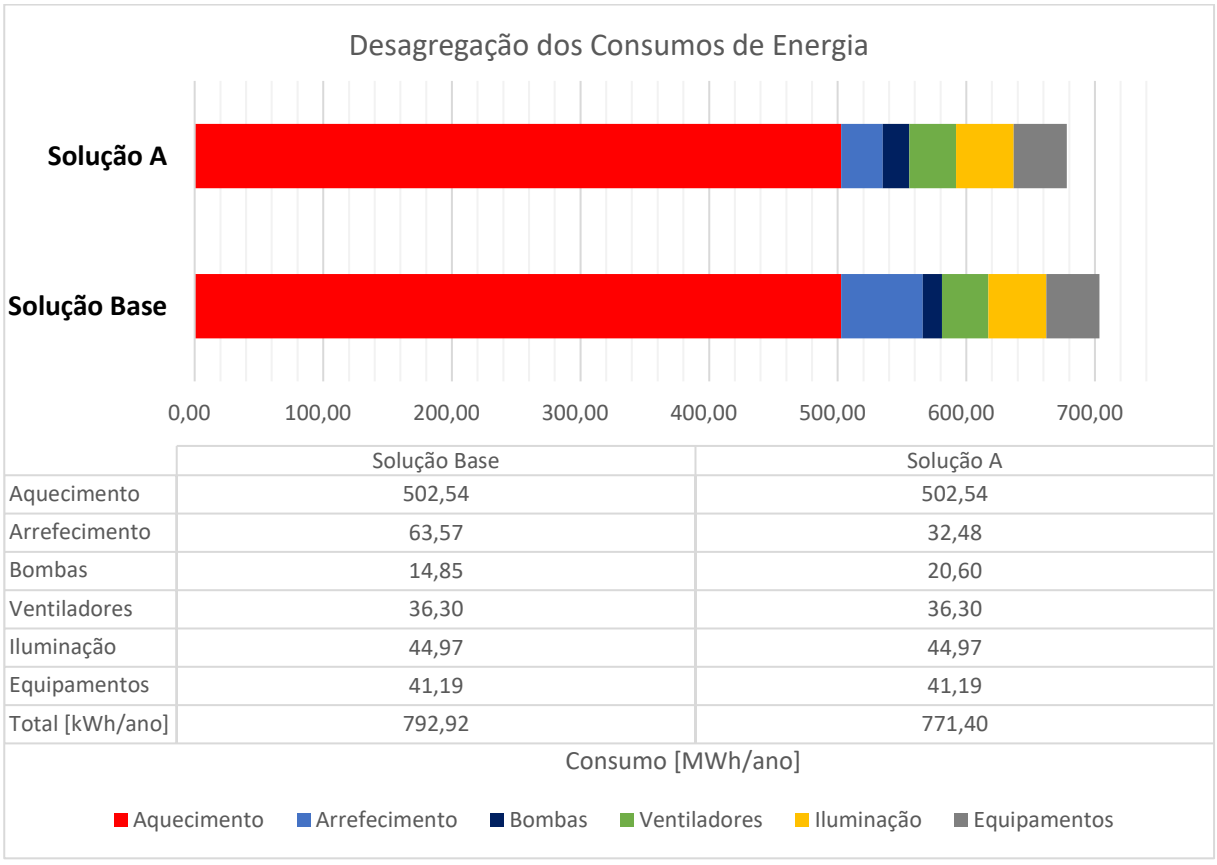
Em que,

$\Delta T_1 = T_{qs} - T_{fe} = 35 - 30 = 5\ °C$

$\Delta T_2 = T_{qe} - T_{fs} = 45 - 41 = 4\ °C$

5.1.3. Resultados e Análise Energética

De seguida apresentam-se os consumos energéticos que dizem respeito aos sistemas de produção de água para aquecimento e arrefecimento, relativos à solução existente (alternativa 1), e à solução A (alternativa 2), que consiste na implementação de um chiller de condensação a água. Os resultados provenientes das simulações surgem a seguir representados graficamente na Figura 46.



	Solução Base	Solução A
Aquecimento	502,54	502,54
Arrefecimento	63,57	32,48
Bombas	14,85	20,60
Ventiladores	36,30	36,30
Iluminação	44,97	44,97
Equipamentos	41,19	41,19
Total [kWh/ano]	792,92	771,40

Figura 46 - Desagregação dos consumos energéticos: solução existente e solução A.

Após análise dos dados, é possível verificar que a solução A (geotermia com chiller de condensação a água), reduz os consumos de energia primária referentes ao arrefecimento, uma vez que o chiller trabalha mais eficientemente, verificando-se uma redução de, aproximadamente, 50%. Prevê-se um aumento do consumo das bombas de circulação, como se veio a verificar na simulação. Os consumos relativos à central térmica de aquecimento mantêm-se iguais, uma vez que não houve qualquer intervenção a este

nível. Como a parcela de maior consumo deriva do aquecimento, que representa cerca de 69% das necessidades globais energéticas do edifício, não se verificam alterações significativas nos consumos finais. Esta solução diminui apenas em 2,7 % os consumos energéticos finais.

Uma vez que os consumos relativos à iluminação e aos equipamentos se mantêm exatamente os mesmo em ambas as alternativas, achou-se pertinente apresentar os consumos de aquecimento e arrefecimento relativos apenas aos sistemas AVAC, para uma mais fácil análise comparativa. Estes consumos surgem discriminados na Figura 47, por consumo de bombas, ventiladores, aquecimento e arrefecimento.

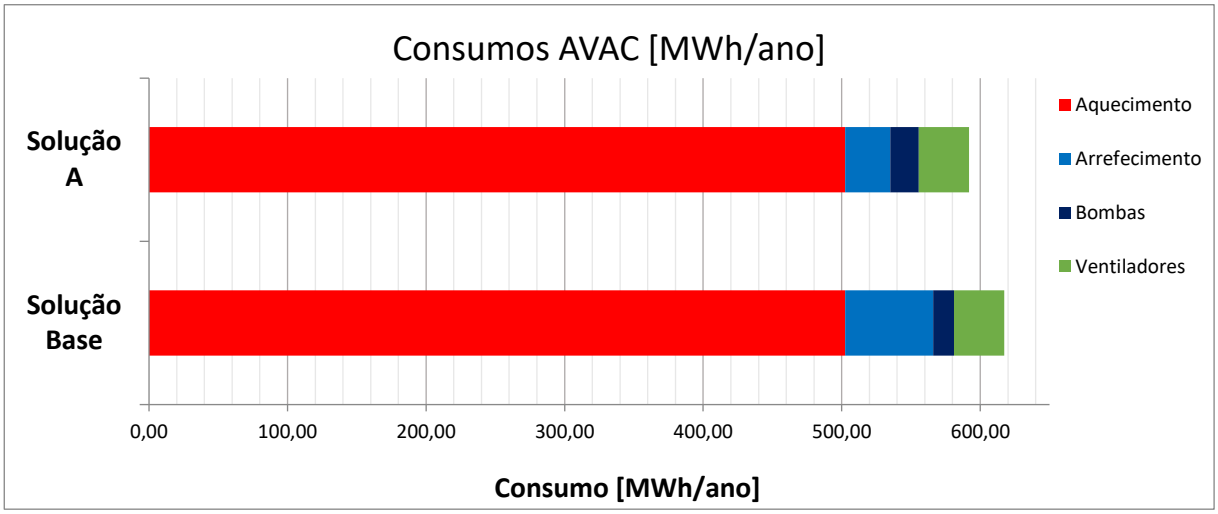


Figura 47 - Desagregação dos consumos de AVAC: solução existente e solução A.

5.1.4. Emissões de CO_2

As emissões de dióxido de carbono relativas à solução em estudo, solução A, apresentaram um valor de 168,60 tCO_2/ano, como se observa na Tabela 34.

Tabela 34 – Emissões (por ano) de dióxido de carbono relativas à solução A.

	Energia Final [MWh]	**Energia Primária [MWh_{EP}]**	**Emissões de dióxido de carbono (tCO_2)**	**Total de emissões (tCO_2)**
Eletricidade	195,17	487,93	70,26	168,60
Gás Natural	486,84	486,84	98,34	

Relativamente à solução existente, cujas emissões de dióxido de carbono rondavam as 176,33 tCO_2/ano, verifica-se uma redução de 7,73 tCO_2/ano.

5.1.5. Análise económica

Deve ser feita uma análise económica comparativa para retirar as respetivas conclusões. A solução implementada (solução A) deve garantir suficientes benefícios e poupanças, de modo a que seja justificado o capital investido para a utilização desejada.

Na Tabela 35 surgem os consumos totais anuais que dizem respeito à solução já existente e à solução analisada neste subcapítulo (solução A), bem como os custos de energia envolvidos. Apresentam-se as poupanças energéticas que a solução A acarreta relativamente à solução existente, assim como as reduções das emissões de dióxido de carbono.

Tabela 35 – Consumos totais e respetivos custos da solução existente e solução A.

	Solução existente	Solução A	Poupança anual	Redução (%)
Consumo [MWh/ano]	792,92	771,40	21,52	2,7 %
Total de emissões [tCO_2/ano]	176,33	168,60	7,73	4,3 %
Custo anual [€/ano]: Gás	47 771 €	47 771 €	0 €	0 %
Eletricidade	31 010 €	27 644 €	3 366 €	10,8 %

Pela Tabela 35 constata-se que a implementação da solução A garante uma redução de cerca de 21 MWh por ano, apenas no consumo respeitante ao arrefecimento, o que se traduz numa poupança de eletricidade de 3 366 € por ano.

É importante saber que estes investimentos são capital-intensivos, significando que os principais custos são os custos iniciais de investimento. Os custos envolvidos neste estudo incluem o custo da instalação relativo ao chiller, aos permutadores de calor, bombas e válvulas, uma vez que não se encontrou dados suficientes para prever custos de mão de obra e manutenção. Assim, os custos aqui apresentados devem ser tidos como valores de grandeza expectável. Considerou-se um custo de investimento inicial de 50 000 €, sendo que este inclui o custo do chiller (15 050 € - proveniente de uma seleção da *TRANE*), dos dois permutadores necessários para a instalação (4 369 € - expostos no anexo K), de bombas, válvulas e outros componentes necessários à correta montagem da instalação. Não foi contabilizado qualquer tipo de inflação de combustíveis e operações, assumindo-se também que não existirão manutenções, de modo a simplificar o estudo económico. A análise económica surge na Tabela 36.

Tabela 36 - Custos envolvidos e retorno de investimento da solução A relativamente à solução existente.

	Em comparação com a solução existente			
	Investimento inicial	**Poupança no consumo energia [MWh/ano]**	**Poupança económica [€/ano]**	**Retorno de investimento simples [anos]**
Solução A	50 000,00 €	21,52	3 366 €	14,9

Para obter o período de retorno do investimento simples é necessário fazer o quociente entre o custo inicial de implementação da solução proposta pelas poupanças anuais. Assim:

$$Retorno\ do\ investimento\ simples = \frac{Investimento\ inicial}{Poupanças\ anuais} = \frac{50\,000}{3\,366} = 14{,}9\ anos \quad (8)$$

A Figura 48 demonstra o retorno do investimento ao longo do ciclo de vida do projeto para a solução A, onde apenas é considerada a poupança anual de energia, sem ter em costa qualquer custo de manutenção ou operação, por falta de informação. Pelo gráfico observa-se que apenas a partir do 15º ano a solução começa a ter lucro, e os ganhos após 20 anos de operação correspondem a 17 320 €.

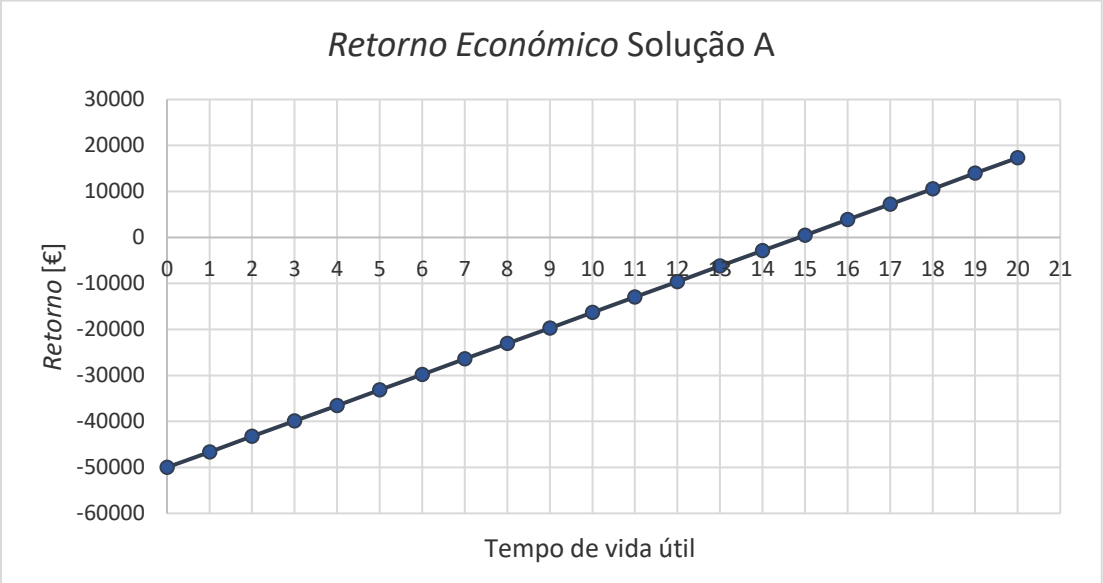


Figura 48 – Retorno económico obtido ao fim de 20 anos de vida útil para a solução A.

5.2 Solução B – Chiller/Bomba de calor reversível com recuperação de calor em ambos os ciclos em modo aquecimento e arrefecimento

Após simulação da solução A e análise dos seus resultados, foi possível concluir que, apesar da implementação ter reduzido significativamente o consumo relativo ao arrefecimento, esta não teve um impacto tão considerável nos consumos globais do edifício. Assim, e uma vez que os maiores consumos são provenientes do aquecimento, achou-se pertinente atuar ao nível da sua otimização. Uma vez que após consulta dos fornecedores deste tipo de equipamentos de produção térmica por ciclo de compressão, de condensação a água, começam a aparecer no mercado, equipamentos que atingem temperaturas acimas dos 80 °C, permitindo assim, implementar estes equipamentos no sistema de produção e distribuição existente, sem implicar a alteração de equipamentos de climatização.

Para tal, na solução B é avaliado um chiller/bomba de calor reversível de condensação a água, capaz de satisfazer simultaneamente as necessidades de quente e frio do edifício. A recuperação de calor tem efeitos significativos na diminuição da energia consumida pelas instalações de aquecimento.

5.2.1. Diagrama de princípio e Modo de funcionamento

O chiller/bomba de calor reversível foi selecionado para as necessidades de aquecimento do edifício, uma vez que estas são superiores comparativamente às necessidades de arrefecimento.

Recorreu-se à análise da solicitação das necessidades de aquecimento, em função da real utilização do edifício, para ser possível fazer uma correta seleção do chiller. Nesse sentido o chiller/bomba de calor foi selecionado de modo a suprir as necessidades de aquecimento. Apesar das necessidades máximas de aquecimento do edifício serem 300 kW (sendo a potência da caldeira existente de 310 kW), verificou-se que a potência de 210 kW garante que se satisfazem cerca de 99% das necessidades de aquecimento anuais. Verifica-se um consumo residual nas caldeiras existentes de 73 kWh/ano, o que corresponde a 0,05% relativamente ao consumo global em aquecimento do edifício (150 500 kWh/ano).

O chiller/bomba de calor reversível, permite o seu funcionamento em dois modos com recuperação total do calor em ambos os ciclos. O modo aquecimento, em que o chiller/bomba de calor dá prioridade às necessidades de aquecimento, que será o modo em que esta solução trabalhará maioritariamente, uma vez que o edifício apresenta mais necessidades em quente, sendo o arrefecimento, caso exista, aproveitado gratuitamente e o excedente permutado para a geotermia. No modo arrefecimento, o chiller/bomba de calor satisfaz primeiramente as necessidades de frio, trabalhando de forma inversa ao modo de aquecimento.

No modo aquecimento, o chiller/bomba de calor necessita de uma potência de aquecimento de 210 kW conforme indicado. Sendo necessário garantir uma temperatura de 80 °C para o depósito de inércia de água quente, e sendo o seu retorno a 65 °C, o diferencial térmico de condensação é igual a 15 °C, sendo o caudal necessário na bomba de calor circuladora do primário de 12 m^3/h. No lado da evaporação, o chiller/bomba de calor vai estar a rejeitar o calor para a geotermia. Mais uma vez é necessário garantir uma temperatura de evaporação na ida do chiller 5 °C abaixo da temperatura geotérmica, para que a permuta de calor seja possível. Para tal, a seleção adequada para este chiller consistiu na temperatura de ida/retorno no lado da evaporação igual a 20/25 °C. O chiller selecionado com a potência de 210 kW em quente, rejeita uma potência de 140 kW em frio. O COP deste equipamento neste modo de

funcionamento é igual a 2,2. A seleção do chiller foi feita conforme a folha técnica do anexo L. A Figura 49 mostra o diagrama de princípio corresponde ao modo de funcionamento em aquecimento.

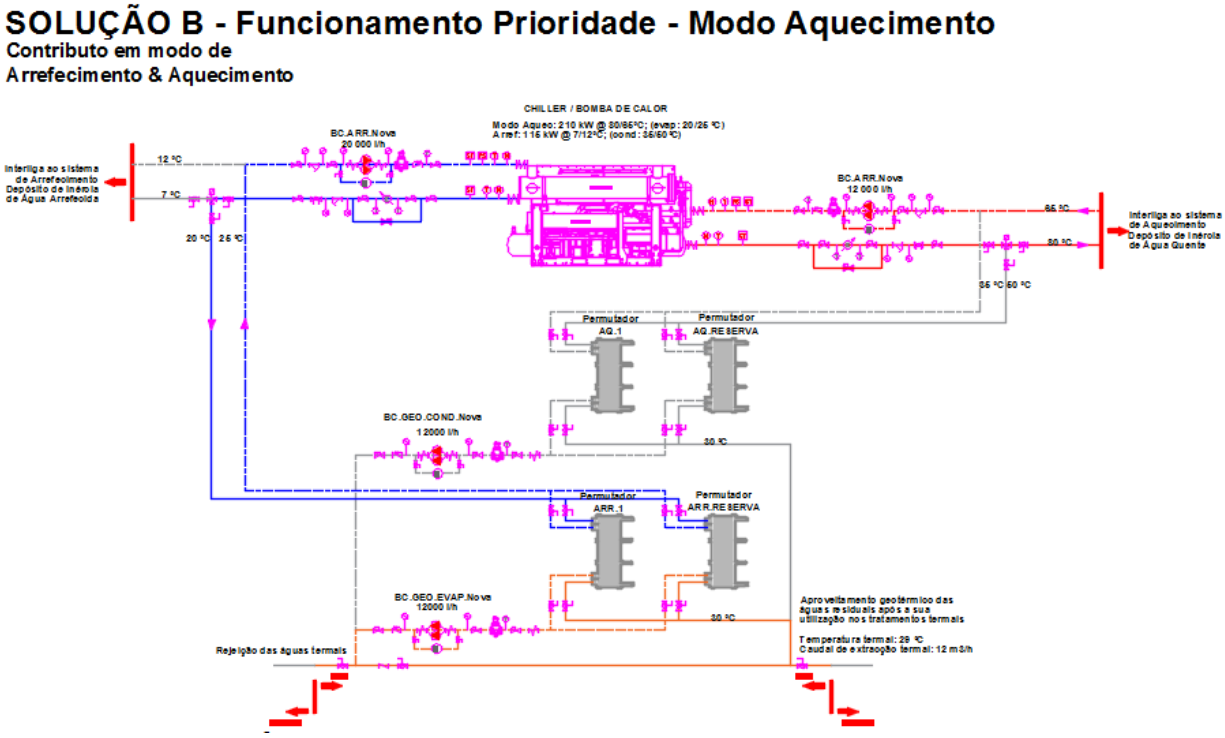


Figura 49 - Diagrama de princípio do chiller/bomba de calor com funcionamento prioridade - modo aquecimento

No modo de arrefecimento, o equipamento vai trabalhar com prioridade para satisfazer as necessidades de frio do edifício. O chiller vai trabalhar para a evaporação com as temperaturas de ida/retorno iguais a 7/12 °C. Para um caudal da bomba de circulação igual a 20 m^3/hora, a potência de arrefecimento é cerca de 116 kW. Neste modo, a condensação vai estar a ser rejeitada para a geotermia. Mais uma vez é necessário que a temperatura de condensação esteja 5 °C acima da temperatura do recurso geotérmico. Para rejeitar uma potência equivalente a cerca de 210 kW, é necessário verificar-se um ΔT de 15 °C para as temperaturas do lado da condensação (50/35 °C), e para uma bomba circuladora de 12 m^3/h. Para estas condições, o COP do chiller/bomba de calor é 3,5. O diagrama de princípio relativo a este modo de funcionamento encontra-se na Figura 50.

Prevê-se a utilização de 4 permutadores para esta solução (solução B), um a trabalhar para o aquecimento e outro a trabalhar para o arrefecimento, havendo um permutador de reserva para cada caso.

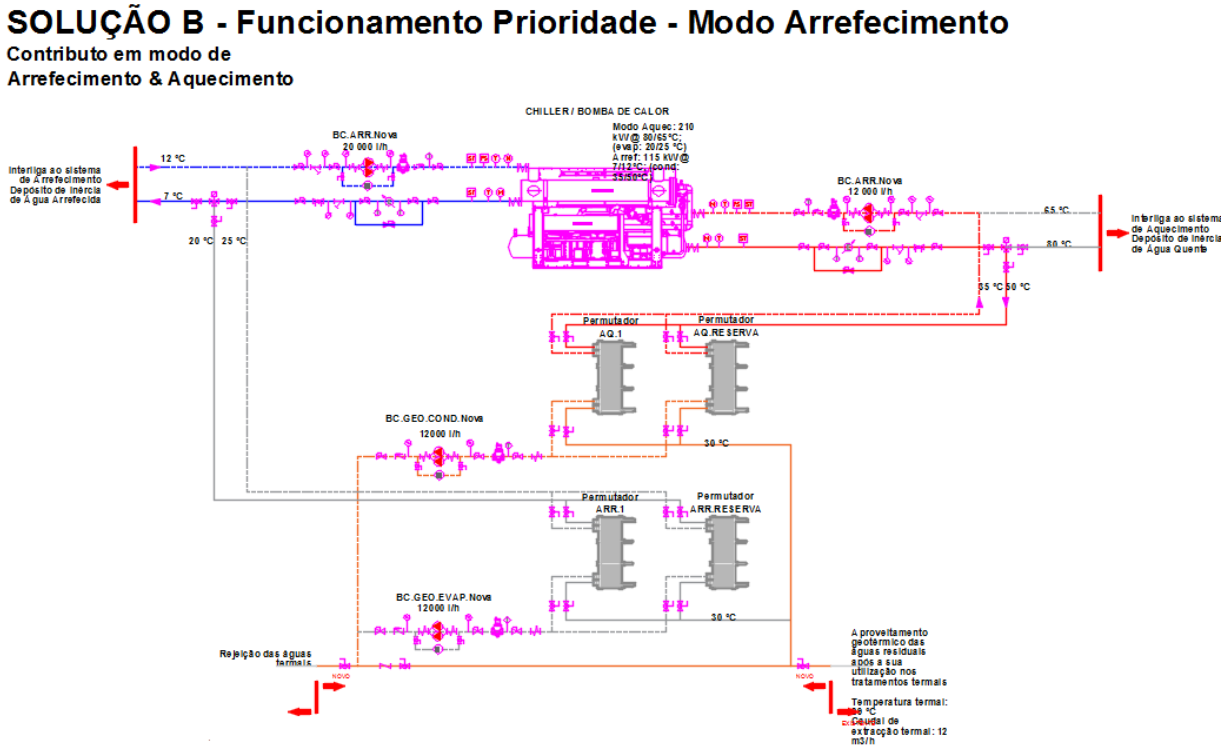


Figura 50 - Diagrama de princípio do chiller/bomba de calor com funcionamento prioridade - modo arrefecimento

5.2.2. Modelação Dinâmica

Para modelar esta solução, recorreu-se à utilização de dois chiller/bombas de calor arrefecidos a água em paralelo (*Bidirectional Cascate*) com aproveitamento da geotermia, permitindo satisfazer as necessidades de arrefecimento, de aquecimento, ou ambas em simultâneo. Continuará a existir a caldeira a gás natural como apoio ao aquecimento, que atua sempre que as necessidades de aquecimento forem superiores à capacidade de produção do chiller. Este procedimento foi realizado recorrendo ao *TRACE 700 User's Manual*, no capítulo *Central Geothermal Chillers* [27].

Começa-se por definir a planta de arrefecimento selecionando dois chillers de condensação a água. Para cada chiller, escolhe-se o tipo de sequência como paralela, introduz-se a potência de arrefecimento (140 kW) e a potência de aquecimento (210 kW). Especifica-se ainda os *COP's* em cada caso. No espaço que diz respeito à rejeição de calor, "*reject heat to plant*", na Figura 51, é necessário indicar a central de produção de energia térmica para onde se quer que o calor seja rejeitado, neste caso, para cobrir as necessidades da caldeira (*heating plant 002*). Para a rejeição de calor do condensador escolhemos o *loop* da geotermia, modelado na solução anterior.

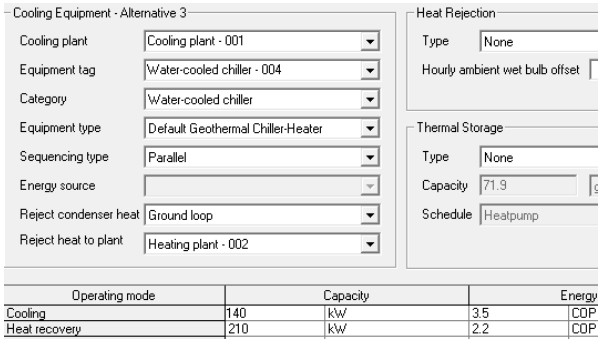
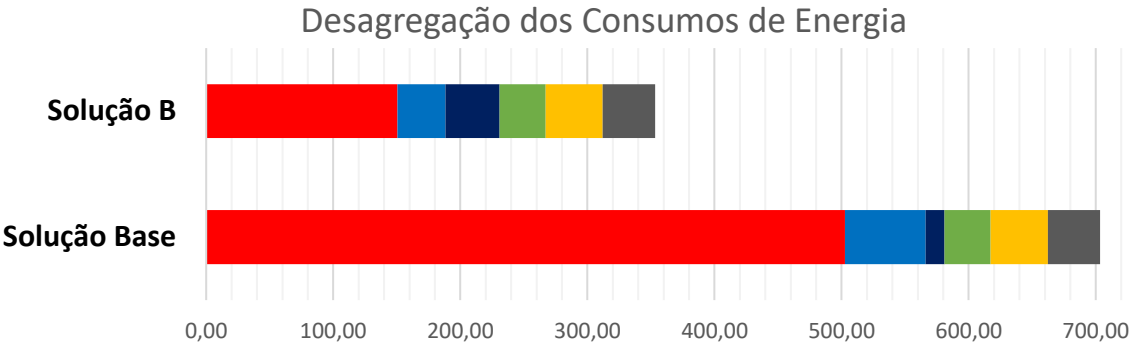


Figura 51 - Modelação do chiller.

5.2.3. Resultados e Análise Energética

Esta solução revelou uma enorme diminuição nos consumos inerentes ao aquecimento, que têm o maior peso nos gastos energéticos do edifício. Na Figura 52 apresentam-se os consumos resultantes da implementação desta solução, obtidos por simulação dinâmica, comparativamente aos consumos da solução já existente.



	Solução Base	Solução B
Aquecimento	502,54	150,50
Arrefecimento	63,57	37,79
Bombas	14,85	42,50
Ventiladores	36,30	36,30
Iluminação	44,97	44,97
Equipamentos	41,19	41,19
Total [kWh/ano]	792,92	450,70

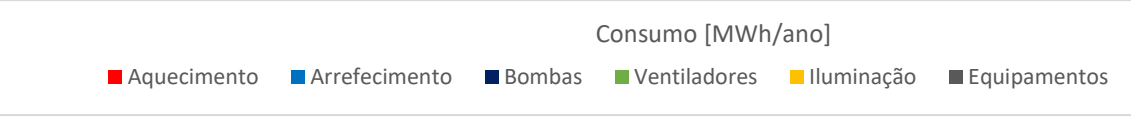


Figura 52 - Desagregação dos consumos energéticos: solução existente e solução B.

A Figura 53, apresenta os consumos de aquecimento e arrefecimento relativos apenas aos sistemas AVAC da solução B.

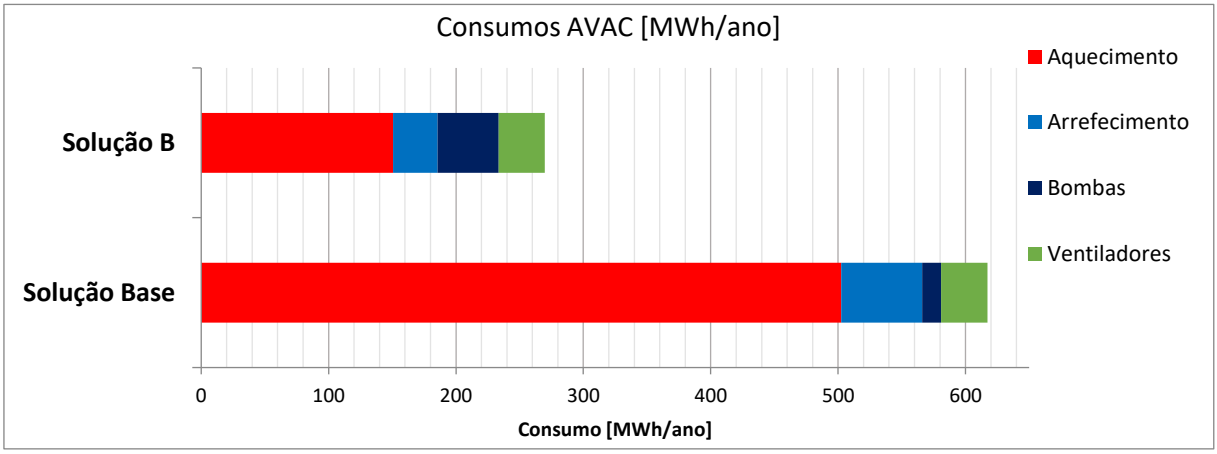


Figura 53 - Desagregação dos consumos de AVAC: solução existente e solução B.

A redução ao nível do consumo relativo ao aquecimento é bastante significativa, traduzindo-se numa redução de 70%. Por sua vez, também os consumos relativos ao arrefecimento diminuem, relativamente à solução existente. Esta diminuição tem um peso nos consumos de arrefecimento de cerca de 40%. Em relação ao consumo das bombas, este aumentou, como era de esperar. Os consumos totais do edifício reduziram em cerca de metade (43%), como se pode observar pela Figura 52. Estes resultados são bastante mais significativos do que os resultados provenientes da implementação da solução A, uma vez que a solução B atua também na redução do consumo de aquecimento, que é o consumo que possui a maior parcela no consumo energético total do edifício.

5.2.4. Emissões de CO_2

Na Tabela 37 apresentam-se os valores correspondentes às emissões de dióxido de carbono resultantes da implementação da solução B.

Tabela 37 – Emissões (por ano) de dióxido de carbono relativa à solução B.

	Energia Final [MWh]	**Energia Primária [MWh_{EP}]**	**Emissões de Dióxido de Carbono (tCO_2)**	**Total Emissões de (tCO_2)**
Eletricidade	361,04	902,60	129,97	129,98
Gás Natural	0,07	0,07	0,01	

Relativamente à solução existente, cujas emissões de dióxido de carbono rondavam as 176,33 tCO_2, verifica-se uma redução de 46,35 tCO_2.

5.2.5. Análise Económica

Na Tabela 38 apresentam-se os consumos totais anuais que dizem respeito à solução existente, e à solução implementada neste subcapítulo (solução B), bem como os custos de energia envolvidos. Apresentam-se as poupanças energéticas resultantes da implementação desta solução.

Tabela 38 - Consumos totais e respetivos custos da solução existente e solução B.

	Solução existente	**Solução B**	**Poupança anual**	**Redução (%)**
Consumo [MWh/ano]	792,92	450,70	342,22	43,1 %
Total de emissões [tCO_2/ano]	176,33	129,98	46,35	26,3 %
Custo anual [€/ano]: Gás	47 771 €	60 €	47 711 €	99,8 %
Eletricidade	31 010 €	47 917 €	- 16 907 €	- 54,5 %

Analisando a Tabela 38, repara-se numa redução dos consumos em cerca de 342 MWh/ano, o que conduz a uma redução de 30 804 € dos custos anuais de energia.

Fazendo a análise do retorno do investimento, considerou-se um custo de investimento inicial de 100 000 € para a solução B. Como não foi possível obter as seleções corretas para os equipamentos, este valor foi estimado, tendo em conta custos do equipameto chiller/bomba de calor, permutadores, bombas, entre outros. Na Tabela 39, apresentam-se resumidamente, o investimento inicial, as poupanças anuais e o retorno do investimento, da solução B relativamente à solução existente.

Tabela 39 - Custos envolvidos e retorno de investimento da solução B relativamente à solução existente.

	Em comparação com a solução existente			
	Investimento inicial	**Poupança no consumo energia [MWh/ano]**	**Poupança económica [€/ano]**	**Retorno de investimento simples [anos]**
Solução B	100 000,00 €	342,22	30 804 €	3,2

Esta solução revela-se economicamente interessante, uma vez que os custos de investimento são reembolsados ao fim de 3,2 anos. De notar que o consumo de energia reduz para mais que metade, assim como o custo anual da mesma.

A Figura 54 demonstra o retorno do investimento ao longo do ciclo de vida do projeto para a solução B, onde apenas é considerada a poupança anual de energia, sem ter em conta qualquer custo de manutenção ou operação, por falta de informação. Pelo gráfico observa-se que a partir do 3º ano a solução começa a ter lucro, e os ganhos após 20 anos de operação correspondem a 516 080 €, tornando esta solução bastante atrativa.

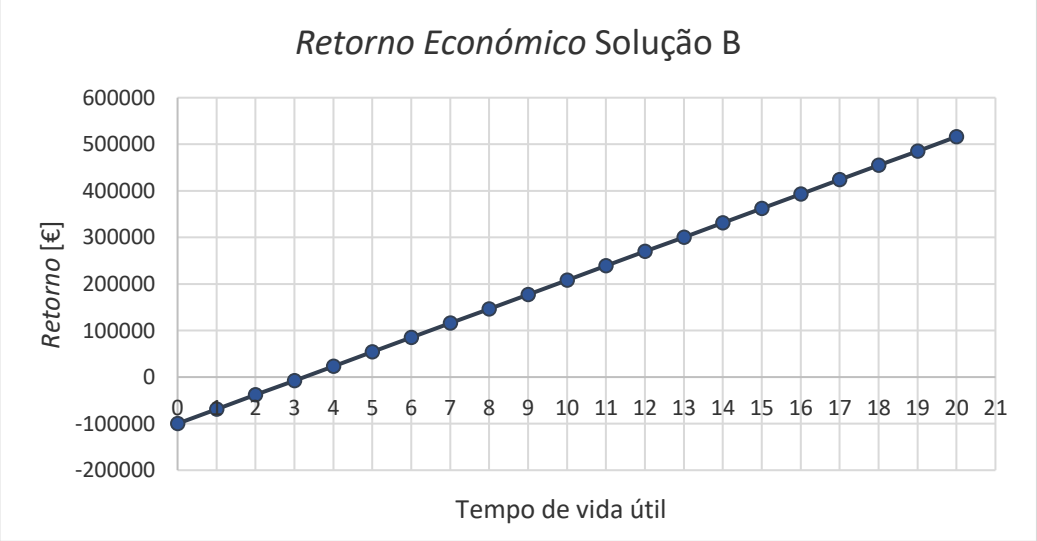


Figura 54 – Retorno económico obtido ao fim de 20 anos de vida útil para a Solução B.

5.3 Solução C – Sistema Fotovoltaico

Neste subcapítulo irá ser dimensionado e avaliado um sistema solar fotovoltaico com potência instalada de pico de 25 kWp em regime de autoconsumo, para abastecer as necessidades elétricas do complexo Termal de Fonte Santa. No regime de autoconsumo, toda a energia elétrica produzida é injetada na instalação de consumo. O excedente pode ser fornecido à rede de distribuição. Este tipo de sistema, apesar do investimento inicial elevado, é ecologicamente limpo, com um tempo de vida útil longo (a vida útil de um módulo fotovoltaico é cerca de 20 anos) e que não requer grande cuidado a nível de manutenção. Além disso reduz significativamente o consumo da energia elétrica. Relativamente à caracterização meteorológica, a localização do edifício em estudo, revela uma boa disponibilidade da radiação solar que pode ter um grande potencial de aproveitamento pela central fotovoltaica. Decidiu implementar-se o sistema fotovoltaico na solução B já analisada (chiller/bomba de calor reversível com recuperação total do calor em ambos os ciclos), uma vez que era aquela que apresentava a maior redução de consumos, relativamente à solução existente.

5.3.1. Regime de autoconsumo – Decreto-Lei n.º 153/2014

Este regime, regulado pelo decreto-lei n.º 153/2014, embora pressupondo que a atividade de produção deve estar associada a uma instalação de utilização de energia elétrica com consumo efetivo e a um contrato de fornecimento de eletricidade celebrado com um comercializador, permitem a entrega total da energia produzida nas respetivas unidades à rede elétrica de serviço público (RESP), a qual é remunerada através do regime geral ou do regime bonificado [49].

As UPAC (Unidades de Produção para Autoconsumo) com potência instalada superior a 1,5 kW e cuja instalação elétrica de utilização se encontre ligada à RESP, estão sujeitas ao pagamento de uma compensação mensal fixa, nos primeiros 10 anos após obtenção do certificado de exploração, calculada com base na seguinte expressão:

$$C_{UPAC,m} = P_{UPAC} \times V_{CIEG,t} \times K_t$$

Sendo,

$C_{UPAC,m}$ – Compensação paga no mês m por cada kW de potência instalada, que permita recuperar uma parcela dos custos decorrentes de medidas de política energética, de sustentabilidade ou de interesse económico geral (CIEG) na tarifa de uso global do sistema, relativa ao regime de produção de eletricidade em autoconsumo;

P_{UPAC} – Potência instalada da UPAC, constante no respetivo certificado de exploração;

$V_{CIEG,t}$ - Valor que permite recuperar os CIEG da respetiva UPAC, medido em € por kW, apurado no ano t nos termos do número seguinte;

K_t - Coeficiente de ponderação, entre 0% e 50%, a aplicar ao $V_{CIEG,t}$ tendo em consideração a representatividade da potência total registada das UPAC no sistema elétrico nacional, no ano t;

t – O ano de emissão do certificado de exploração da respetiva UPAC [49].

5.3.2. Modelação Dinâmica

O projeto e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos ligados à rede dependem essencialmente das condições a seguir apresentadas:

- Especificações técnicas dos módulos e inversor;
- Espaço disponível nos telhados, orientação e ângulo de inclinação;
- Localização geográfica, longitude e latitude;
- Disponibilidade financeira.

Primeiramente, utilizou-se *software PVsyst* para fazer a simulação do sistema em estudo, com a localização e orientação conhecidas. Recorreu-se à *SolarWorld* para selecionar os módulos fotovoltaicos. Estes serão de silício monocristalino do tipo *Sunmodule* SW PL 280 e apresentam um rendimento de 16,7%, apresentando uma ótima relação de qualidade/preço (0,098 €/ Wp). As suas características encontram-se no anexo M. Para calcular o número de módulos dividiu-se a potência de pico do sistema fotovoltaico pela potência de pico do módulo escolhido:

$$Número\ de\ módulos\ = \frac{Pot\ fotovoltaico\ [Wp]}{Pot\ módulo\ [Wp]} = \frac{24\,600}{280} \cong 88 \tag{9}$$

O sistema será assim será composto por 88 painéis fotovoltaicos organizados em 4 *strings* (22 módulos em série em cada), totalizando uma área de 147,5 m^2. A potência nominal é 25 kW e a tensão máxima é 86 V. Estes serão instalados no telhado com uma inclinação de 34º, considerando os cálculos a seguir, e com uma orientação ao azimute sul, de forma a fiquem livres de sombras. Selecionados os painéis, é preciso escolher um inversor, que realiza a conversão da corrente contínua em corrente alternada. Assim, foram escolhidos dois inversores, de 12 kW com máxima tensão de entrada igual a 800 V.

Para calcular a inclinação ótima dos painéis fotovoltaicos, recorreu-se ao *software* de cálculos regulamentares do sistema de certificação de edifícios relativos ao aproveitamento de energias renováveis (SCE.ER versão 1.6.3), da DGEG. A inclinação ideal é de 34º, para a qual se obteve a maior produção disponível. Os resultados relativos à energia solar incidente, produção fotovoltaica potencial (DC – corrente contínua) e produção disponível (AC – corrente alternada) mensais apresentam-se a seguir na Tabela 40.

Tabela 40 - Informação dos consumos do sistema fotovoltaico.

temperatura	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	**anual**	
ambiente (média diária)	6,8	8,2	10,4	12,0	15,6	20,4	24,0	23,9	21,0	15,4	10,5	7,9	**14,7**	°C
nos módulos (média diurna)	23,5	25,6	30,8	30,2	34,5	41,0	47,7	53,0	50,2	39,5	33,7	24,5	**36,2**	°C

energia	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	**anual**	
radiação solar incidente	13 288	16 582	24 003	24 239	27 835	29 771	31 778	31 404	26 227	19 654	15 187	10 384	**270 352**	kWh
produção fotovoltaica (DC)	2 214	2 754	3 929	3 943	4 469	4 799	4 851	4 783	4 053	3 157	2 478	1 744	**43 021**	kWh
perdas do sistema (DC)	-59	-74	-106	-106	-120	-129	-130	-129	-109	-85	-67	-47	**-1 156**	kWh
consumos parasíticos (AC)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**-1**	kWh
outras perdas (AC)	-118	-147	-209	-210	-238	-256	-258	-255	-216	-168	-132	-93	**-2 292**	kWh
produção disponível (AC)	1 929	2 400	3 423	3 435	3 894	4 181	4 226	4 167	3 530	2 751	2 159	1 520	**37 479**	kWh

Uma vez determinado o número de módulos foi necessário verificar se é possível colocá-los no espaço disponível na cobertura. Assim, calculou-se a distância mínima entre fileiras, representada como d na Figura 55.

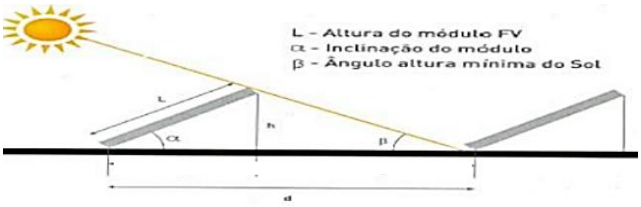


Figura 55 - Distância mínima entre painéis fotovoltaicos.

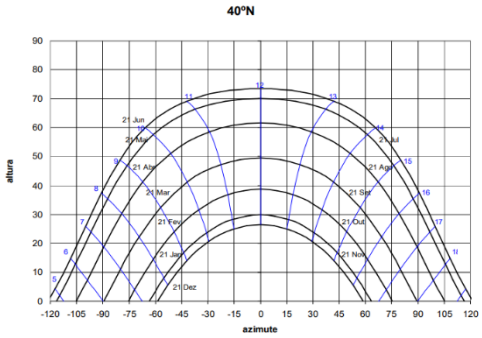


Figura 56 - Carta Solar para a latitude do local.

Recorrendo à geometria solar e sabendo que:

L (altura do painel fotovoltaico) = 1,675 m

α (inclinação do painel fotovoltaico) = 34 º

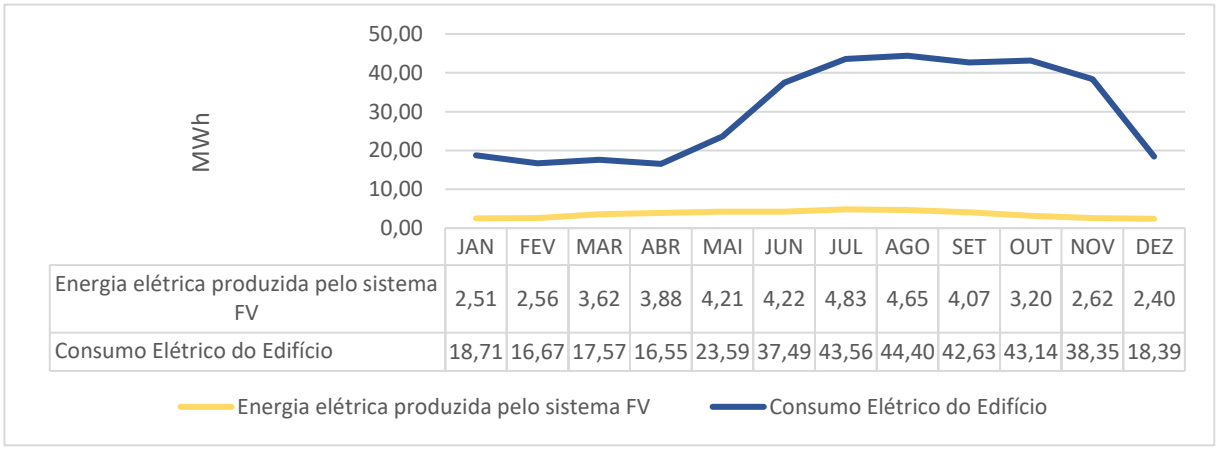
β (ângulo da altura mínima do sol, observada no dia 21 de dezembro) = 10 º

a (azimute - Figura 56) = $\pm$ 46 º

Calculou-se a distância mínima entre fileiras que é igual a 5,10 metros, sendo a largura de cada painel igual a aproximadamente 1 metro. Isto resulta numa largura total mínima de 20 metros, e num comprimento mínimo de 16,7 metros, ou seja, uma área disponível de cerca de 334 m^2. Existe disponibilidade de área na cobertura para a respetiva área do sistema fotovoltaico.

5.3.3. Resultados e Análise Energética

Após a introdução dos dados relativos ao sistema fotovoltaico no *PVsyst* foi possível calcular a produção de energia elétrica por parte deste sistema, e os resultados encontram-se no anexo N. A Figura 57 representa a evolução do consumo elétrico anual do edifício em comparação com a produção disponível fotovoltaica, simulada no *PVsyst*.



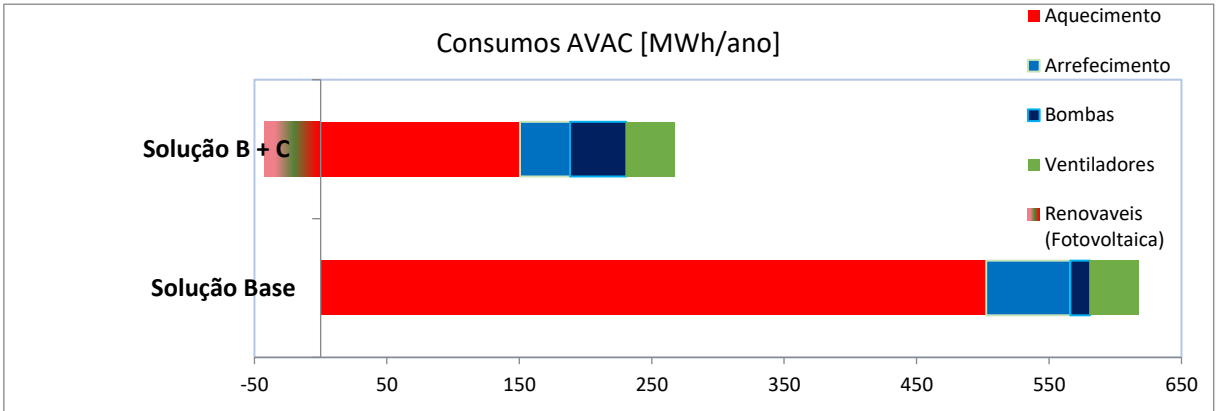
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Energia elétrica produzida pelo sistema FV	2,51	2,56	3,62	3,88	4,21	4,22	4,83	4,65	4,07	3,20	2,62	2,40
Consumo Elétrico do Edifício	18,71	16,67	17,57	16,55	23,59	37,49	43,56	44,40	42,63	43,14	38,35	18,39

Figura 57 - Consumo elétrico do edifício e energia elétrica produzida pelo sistema FV.

Segundo os resultados obtidos do *PVsyst*, o sistema fotovoltaico modelado irá produzir a energia elétrica estimada em 42,78 MWh/ano.

Esta medida de racionalização de energia, será então implementada na solução B (geotermia com apoio a caldeira e a bomba de calor de condensação a água com recuperação de calor). Sabe-se que relativamente à solução B, a implementação desta solução reduz o consumo de energia total em 42,78 MWh/ano, o que se traduz numa poupança anual de 5 989,2 €, considerando a tarifa elétrica regulada a 0,14 €/kWh, valor retirado da simulação. Sendo o consumo de eletricidade da solução B igual a 361,04 MWh/ano (Tabela 37), é expetável que o consumo baixe para os 318,26 MWh/ano.

Na Figura 58, é possível comparar a redução de consumos que esta solução (B + C) acarreta face à solução existente.



	Solução Base	Solução B + C
Aquecimento	502,54	150,50
Arrefecimento	63,57	37,79
Bombas	14,85	42,50
Ventiladores	36,30	36,30
Renovaveis (Fotovoltaica)	0,00	-42,78

Consumo [MWh/ano]

Figura 58 - Consumos energéticos da solução B + C comparativamente à solução existente.

5.3.4. Emissões de CO_2

Na Tabela 41 apresentam-se as emissões de dióxido de carbono anuais correspondentes à implementação desta solução. Como o consumo de eletricidade reduz, é de expectar que as emissões de CO_2 também. Assim, verificou-se uma redução, relativamente à solução já existente, de 61,75 tCO_2 por ano.

Tabela 41 - Emissões de dióxido de carbono da solução B + C.

	Energia Final [MWh]	**Energia Primária [MWh_{EP}]**	**Emissões de Dióxido de Carbono (tCO_2)**	**Total Emissões de (tCO_2)**
Eletricidade	318,26	795,65	114,57	114,58
Gás Natural	0,07	0,07	0,01	

5.3.5. Análise Económica

Os sistemas solares fotovoltaicos têm geralmente um custo inicial (investimento) superior ao das alternativas convencionais. No entanto, a longo prazo permitem poupar na energia consumida. A análise económica da solução C implementada na solução B, será também feita por comparação com a solução existente. Para saber o custo do investimento inicial que esta solução acarreta, foi necessário saber qual o preço de cada módulo. Considerou-se que cada módulo custa aproximadamente 275 €, o que equivale a 0,98 €/ Wp, segundo o catálogo da *Solaris* [50].

Assim, o investimento previsto para a instalação do sistema descrito (apenas relativo ao sistema fotovoltaico) ronda os 30 000 € (≅ 275x88 + inversor + custos adicionais), e apresenta uma poupança anual de 5 989,20 €/ano. Na Tabela 42, apresentam-se as poupanças anuais, relativamente à solução existente, resultantes da implementação da solução B + C.

Tabela 42 - Consumos totais e respetivos custos da solução existente e solução B + C.

	Solução existente	Solução B + C	Poupança Anual	Redução (%)
Consumo [MWh/ano]	792,92	407,92	385,00	48,5 %
Total de emissões [tCO_2/ano]	176,33	114,58	61,75	35,0 %
Custo anual [€/ano]: Gás	47 771 €	60 €	47 711	99,8 %
Eletricidade	31 010 €	41 928 €	-10 918	- 35,2 %

Na Tabela 43 é possível observar os consumos antes e depois da instalação fotovoltaica, relativamente à solução já existente. Seria de esperar que o consumo relativo à eletricidade fosse mais pequeno depois da implementação do sistema fotovoltaico, no entanto, os consumos relativos à eletricidade apresentam valores superiores, uma vez que estes consumos já advêm da solução B, em que o consumo de eletricidade (proveniente do chiller/bomba de calor) aumentou significativamente. Segundo esta estimativa, a proposta que consiste na alternativa C implementada na alternativa B, estaria paga ao fim de 3,5 anos de produção de energia, nas condições previstas.

Tabela 43 - Custos envolvidos e retorno de investimento da solução B relativamente à solução existente.

Em comparação com a solução existente					
Custo da instalação		Energia consumida antes da implementação [MWh/ano]	Energia consumida depois da implementação [MWh/ano]	Poupança económica [€/ano]	Retorno do investimento simples (anos)
100 000 € + 30 000 €	Eletricidade	216,63	318,26	36 793	3,5
	Gás Natural	486,84	0,07		
	Solar	0	42,78		

Esta é a solução que apresenta uma melhor viabilidade económica, como se observa na Figura 59. Apesar da solução B apresentar um tempo de retorno de investimento mais baixo (3,2 anos), a implementação do sistema fotovoltaico garante maiores poupanças económicas ao longo do tempo de vida útil. Esta solução, apresenta uma poupança, ao fim de 20 anos, correspondente a 605 860 € por ano, relativamente à solução existente.

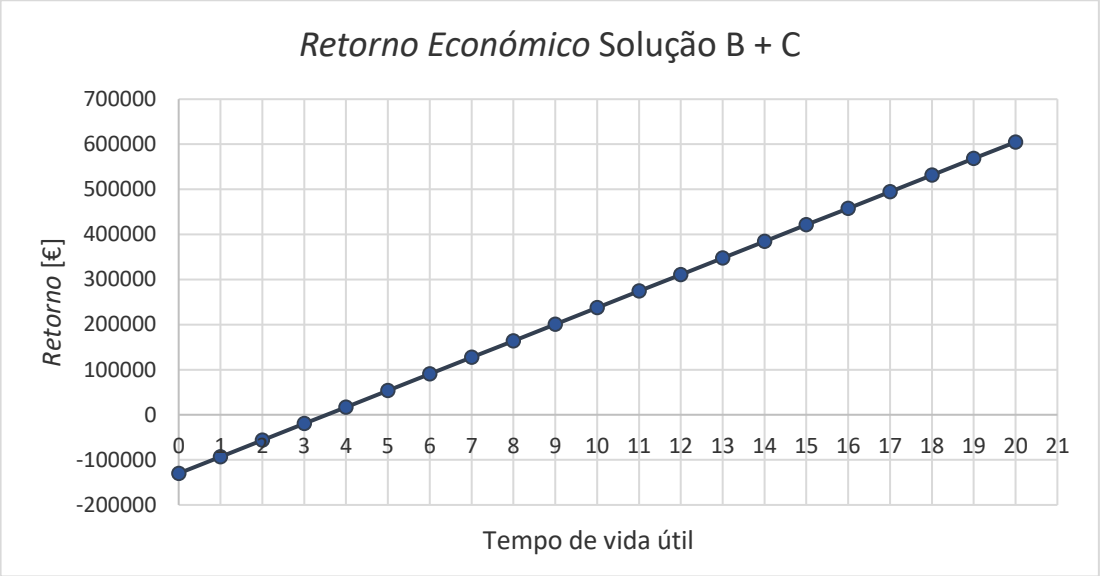


Figura 59 - Retorno económico obtido ao fim de 20 anos de vida útil para a solução B + C.

5.4 Comparação energética e económica das 3 alternativas

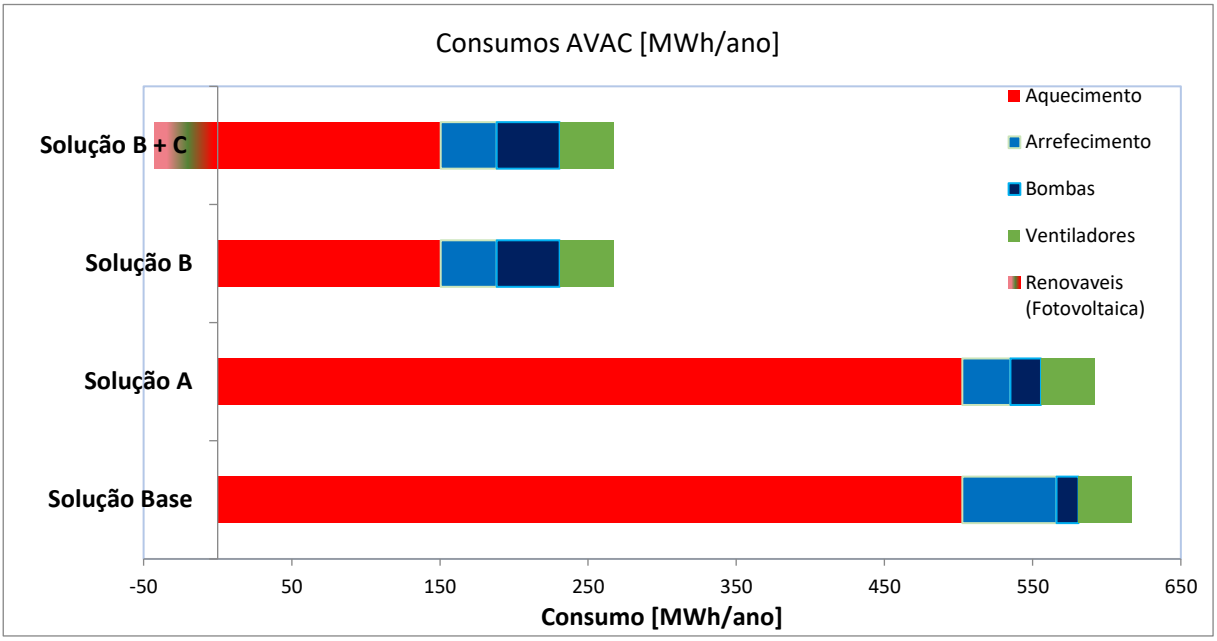


Figura 60 – Desagregação dos consumos energéticos (AVAC) da solução existente e das 3 alternativas simuladas.

Relativamente às soluções analisadas no presente relatório, constata-se que aquela que apresenta melhores resultados é a solução B + C, que consiste, como já foi visto, na utilização de um chiller/bomba de calor reversível a satisfazer simultaneamente as necessidades de aquecimento e arrefecimento do edificio, com a instalação de um sistema fotovoltaico composto por 88 módulos fotovoltaicos. Esta solução, apesar de ser a que requer um maior investimento inicial, é aquela que apresenta menores consumos anuais, sendo o retorno do investimento cerca de 3,5 anos. Apresenta uma redução, relativamente aos consumos totais anuais do edificio de cerca de 49%. É também a solução com menores emissões de dióxido de carbono, representando uma redução de 35% relativamente à solução existente. Na Tabela 44 apresentam-se, de uma forma resumida, todos os consumos relativos a cada solução avaliada, para uma mais fácil comparação dos resultados.

Tabela 44 - Consumos totais e respetivos custos de cada solução implementada.

	Solução existente	Solução A	Solução B	Solução B + C
Consumo [MWh/ano]	792,92	771,4	450,7	407,92
Total de emissões [tCO_2/ano]	176,33	168,69	129,98	114,58
Investimento inicial [€]	-	50 000 €	100 000 €	130 000 €
Custos Anuais [€/ano]:	78 781 €	75 401 €	47 977 €	41 988 €
Poupança económica [€/ano]	-	3 366 €	30 804 €	36 793 €
Retorno do investimento simples [anos]	-	14,9	3,2	3,5

5.4.1. Análise da Classificação Energética

A classificação energética trata-se de um indicador global do desempenho energético de um edifício, baseado em pressupostos nominais e segue uma escala pré-definida de 7+2 classes (A+, A, B, B-, C, D, E, F, G), em que a classe A+ corresponde a um edifício com melhor desempenho energético, e a classe G corresponde a um edifício de pior desempenho energético. Na Tabela 45, surgem as respetivas classes, correspondendo a cada classe um intervalo de valores de R_{IEE}, de acordo com o apresentado na tabela. A classe energética do edifico em estudo corresponde à classe energética C [51].

Tabela 45 - Valores de R_{IEE} por classe energética [51].

Classe Energética	Valor de R
A +	$R \leq 0{,}25$
A	$0{,}25 < R \leq 0{,}50$
B	$0{,}50 < R \leq 0{,}75$
B -	$0{,}75 < R \leq 1{,}00$
C	$1{,}00 < R \leq 1{,}50$
D	$1{,}50 < R \leq 2{,}00$
E	$2{,}00 < R \leq 2{,}50$
F	$2{,}50 < R \leq 3{,}00$
G	$R > 3{,}00$

O desempenho energético de um edifício de comércio e serviços é, assim, aferido pela determinação do seu indicador de eficiência energética (IEE). Este é determinado com base no somatório dos diferentes consumos anuais de energia, agrupados em indicadores parciais e convertidos para energia primária por unidade de área interior útil de pavimento, tendo por base a seguinte expressão geral:

$$\text{IEE} = \mathbf{IEE_S} + \mathbf{IEE_T} - \mathbf{IEE_{REN}} \quad [\text{kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2.\text{ano}] \tag{10}$$

Em que,

IEE_S – Indicador de eficiência energética de consumos do tipo S ($\text{kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2$.ano), representa os consumos de energia que são considerados para efeitos de cálculo da classificação energética do edifício;

IEE_T – Indicador de eficiência energética de consumos do tipo T ($\text{kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2$.ano), representa os consumos de energia que não são considerados para efeitos de cálculo da classificação energética do edifício;

IEE_{REN} – Indicador de eficiência energética renovável ($\text{kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2$.ano), é determinado com base na produção de energia elétrica e térmica a partir de fontes de energias renováveis [48].

Assim, os resultados dos respetivos indicadores de eficiência energética, de acordo com a metodologia de cálculo descrita na Portaria 349-D/2013, surgem apresentados na Tabela 46. Desta forma é possível a sua comparação com o cenário inicial de desempenho energético do edificio antes da implementação das respetivas medidas de melhoria.

Tabela 46 - Cálculo do índice de eficiência energética para cada solução.

	Previsto				Referência
	Solução existente	**Solução A**	**Solução B**	**Solução B + C**	
IEE_S	412,45	384,37	355,52	355,52	377,90
IEE_T	45,82	45,82	45,82	45,82	26,20
IEE_{REN}	0,00	0,00	0,00	47,59	0,00
Total	458,27	430,19	401,34	353,75	404,10

A classe energética é determinada, segundo o RECS, através do rácio de classe energética (R_{IEE}), expresso na equação 11, e os valores obtidos para cada simulação encontram-se na Tabela 47.

$$R_{IEE} = \frac{\mathbf{IEE_S} - \mathbf{IEE_{REN}}}{\mathbf{IEE}_{Ref,S}} \quad [kWh_{EP}/m^2.ano] \tag{11}$$

Tabela 47 - Cálculo do R_{IEE}

	R_{IEE}	Classe Energética
Solução existente	1,09	C
Solução A	1,02	C
Solução B	0,94	B-
Solução B + C	0,81	B-

O edifício em estudo apresenta a classe energética C, uma vez que este foi licenciado no ano de 2006. Avaliando o enquadramento regulamentar que cada solução aporta na classificação energética final do edificio, é possível perceber o seu impacto relativamente à solução existente, sendo que apenas se efetuaram alterações ao nível dos equipamentos de produção de energia térmica. A solução B + C é aquela que apresenta uma melhor classificação energética. Para esta solução apresentar a classe energética B, seria necessário verificar-se uma redução em cerca de 21 MWh/ano dos consumos energéticos globais do edificio, o que corresponde a cerca de 5% (consumo total = 407,92 MWh/ano). Para tal, poderiam ser propostas várias soluções com o objetivo de reduzir esse consumo, conforme indicado em futuros trabalhos.

6 Conclusões

A etapa da conceção do modelo do edifício para simulação dinâmica detalhada, foi a que exigiu a maior atenção aquando da sua realização, por constituir a base de todo o trabalho realizado, e pela qualidade do produto da simulação depender diretamente da qualidade do modelo criado. Constatou-se assim a dificuldade existente no projeto de dimensionamento de um sistema AVAC.

Apesar da experiência em simulação no *TRACE 700* garantir que é possível obter resultados muito próximos dos reais, quando se simula um edifício existente com consumos e padrões de funcionamento conhecidos, no caso da modelação do edifício de serviços em estudo, foram várias as dificuldades que surgiram, mas que tentaram sempre ser ultrapassadas recorrendo às devidas regulamentações e entidades especializadas. Estas dificuldades prenderam-se, essencialmente, ao nível da falta de informação relativa ao edifício em estudo (por exemplo: constituição e características térmicas da envolvente, perfis de utilização do edifício, perfil de águas quentes sanitárias, perfil de iluminação, etc.). Recorrer a considerações, mesmo com base em fontes credíveis, não é o ideal, uma vez que contribui para que o modelo do edifício se distancie do edifício real. No entanto, apesar das adversidades que limitaram os resultados logo à partida, foi possível chegar a valores coerentes entre consumos reais e simulação, concluindo-se que o erro na aproximação da simulação ao edifício real é bastante aceitável, tendo-se registado 1% relativamente ao consumo de eletricidade anual e 0% relativamente ao consumo de gás natural.

A etapa da simulação englobou então, duas partes principais. Na primeira simulou-se o modelo com base em pressupostos reais de utilização do edifício com o objetivo de aproximar o mais possível o modelo criado da realidade. Desta forma, foi também possível entender de que maneira se comporta o edifício, e quais os elementos que mais contribuem para os consumos energéticos consequentemente, e para as faturas energéticas anuais. Conclui-se, no capítulo da simulação térmica, que para o edifício em estudo as necessidades energéticas predominantes são as que dizem respeito ao aquecimento (69% do consumo total de energia térmica do edifício), principalmente devido aos equipamentos da piscina que apresentam grandes consumos durante o ano. Foram ainda verificadas as emissões de CO_2, que corresponderam a 176,33 tCO_2/ano e o índice de eficiência energética efetivo com base nas faturas energéticas, tendo-se verificado que este valor foi muito semelhante ao IEE previsto, com base nos dados da simulação, o que mais uma vez veio corroborar a qualidade da simulação térmica dinâmica. O edifício apresenta uma classe energética C.

A segunda fase da simulação, consistiu em aplicar as 3 medidas de melhoria propostas, aproveitando o recurso geotérmico já existente no local para os tratamentos termais. Mais uma vez, a valorização do recurso geotérmico prendeu-se na preocupação em valorizar os recursos endógenos, na diminuição dos consumos energéticos totais do complexo termal, e também das emissões de CO_2. Através da simulação dinâmica de cada solução, foi possível analisar e comparar o impacto de cada solução na redução dos consumos energéticos da solução já existente.

Verificou-se que a solução A (chiller de condensação a água, com rejeição da condensação para a geotermia) apresentou reduções significativas ao nível do arrefecimento, mas olhando para os consumos energéticos totais do edifício, apenas reduziu 2,7% (relativamente à solução já existente). Com esta solução o edifício mantém a classe energética C. Assim, e sabendo que o aquecimento é responsável pela maior percentagem dos consumos finais, o seguinte passo foi atuar ao nível da sua otimização.

Deste modo, a solução B (chiller/bomba de calor reversível com recuperação total do calor em ambos os ciclos, aproveitando o recurso geotérmico disponível), foi avaliada com o intuito de eliminar o consumo do equipamento convencional já existente, a caldeira. Os resultados foram bastante satisfatórios, uma vez que as necessidades de aquecimento diminuíram em 70% relativamente à solução existente. Verificou-se também uma redução nos consumos de arrefecimento, no entanto os consumos de eletricidade aumentaram, pois nesta solução o consumo relativo ao aquecimento (150 MWh/ano) é elétrico, sendo os consumos da caldeira residuais. A solução B melhorou a eficiência energética do edifício, passando este a possuir a classe energética B-.

Por fim, achou interessante implementar-se um sistema fotovoltaico no edifício. Esta solução revelou uma redução no consumo energético do edifício em 42,78 MWh/ano (reduzindo o consumo elétrico relativo à solução existente em cerca 12%). Implementando esta solução, na solução B, que apresentou a maior redução dos consumos energéticos, obtém-se um consumo anual igual a 407,92 MWh/ano (reduzindo em 51% o consumo energético da solução existente). O retorno desta solução revelou-se bastante interessante, correspondendo a 3,5 anos, comportando poupanças energéticas de cerca de 36 793 €/ano.

Com a implementação destas medidas, onde a geotermia é uma mais valia energética, salienta-se ainda a importância, num mercado predominado sobretudo pelas preocupações de menor custo de instalação e equipamentos, das tecnologias alternativas que favoreçam uma melhor racionalização do consumo energético e soluções eficientes. Assim, o presente trabalho contribui também para dar a conhecer o potencial do aproveitamento desta energia, que se encontra ainda pouco divulgado. Perceber o seu funcionamento, as vantagens e poupanças energéticas e económicas que acarreta, permite uma maior consciencialização acerca deste tipo de tecnologia, bem como uma maior propagação e investimento.

Por último, mas não menos importante, salienta-se de todo o trabalho realizado, a aquisição de novos conhecimentos e competências, bem como todos os problemas que se levantaram ao longo do projeto e que proporcionaram a procura constante de novas soluções para os mesmos. Foi uma experiência desafiante e muito enriquecedora a nível tanto académico, como pessoal.

7 Trabalhos futuros

De modo a tornar o edifício mais eficiente comportando uma classe energética melhor, são propostas uma série de medidas de racionalização de energia para trabalhos futuros. Estas propostas deverão ser apoiadas pela respetiva simulação e pela devida análise económica.

Primeiramente, e como forma a reduzir os consumos energéticos que ocorrem na piscina, que detêm um grande peso nos consumos finais do edifício, aconselha-se a utilização de cobertura na piscina durante o período noturno com o objetivo de minimizar a evaporação durante esse período, o que irá reduzir significativamente o consumo energético do edifício.

Após isto, é possível também desligar o equipamento de renovação de água da piscina e a unidade de desumidificação nos longos períodos de não utilização, devendo comparar o custo do volume de água necessário para encher completamente o tanque da piscina, de forma a verificar se compensa ou não o seu esvaziamento. Outra medida que permitirá reduzir os consumos é a utilização de um duplo *set point* na piscina durante o período noturno.

Ao nível da unidade desumidificadora, avaliar a possibilidade de realizar o reaquecimento para o ar ambiente e a água da piscina, como resultado da condensação do ciclo de arrefecimento devido às necessidades de desumidificação (recuperação da condensação), reduzindo assim os consumos relativos ao aquecimento ambiente e da água da piscina.

Será também relevante avaliar o impacto da envolvente transparente nos consumos energéticos finais do edifício, uma vez que existem fachadas que comportam uma grande fração de envidraçados, atuando também de forma a melhorar o fator solar do vidro.

Sendo que a classe energética mais favorável resultante das simulações, correspondeu à solução B + C (classe energética B-) seria interessante atuar ao nível da sua otimização. Uma vez que, como foi referido, é preciso diminuir os consumos globais em 21 MWh, para o edifício alcançar a classe energética B, seria interessante aumentar a área do sistema fotovoltaico analisado em 50%, uma vez que este produz energia elétrica total de 42,78 MWh/ano.

A implementação de todas as medidas de melhoria propostas em cima, pode contribuir para o edifício alcançar a classe energética A. Assim, será interessante também a avaliar a simulação do edifício nessas condições e a verificação dos novos índices de eficiência energética.

É também proposto, para trabalhos futuros, as corretas seleções dos equipamentos de produção de energia térmica nas condições nominais e os respetivos preços, para ser possível realizar uma análise da viabilidade económica mais correta e ajustada a cada solução.

Referências

1. *DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia - Geotermia - Energia Renovável em Portugal. 1ª ed. Lisboa: 2017. ISBN 978-972-8268-43-5*.
2. *UNIÃO EUROPEIA. Directiva 2010/31/UE, de 19 Maio 2010. Jornal Oficial da União Europeia, 18 Junho 2010.*
3. *Europeu, P. & da União Europeia, C. Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis. Jornal Oficial da União Europeia, 2009*.
4. *ENERDATA. Global Energy Statistical Yearbook 2018 [Online]. Disponível em: http://yearbook.enerdata.net/. [Acedido em 23/06/2019]. .*
5. Marrero Diaz, R., P. Madureira, and E.C. Ramalho. *A Plataforma Portuguesa de geotermia superficial-análise SWOT*. in *IX Congresso Nacional de Geologia/2º Congresso de Geologia dos Países de Língua Portuguesa: IX CNG/2º COGEPLIP*. 2014.
6. *Ramalho, E. C., Madureira, P., Lourenço, C., Francés, A., Joyce, A., Silva, L. D., & Silva, L. (2014). A plataforma portuguesa de geotermia superficial e o seu papel na dinamização do mercado da geotermia em Portugal. In Comunicação apresentada em 2º Congresso de Geologia dos Países de Lingua Portuguesa, em Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/185*.
7. *Coelho, L., Cerdeira, R., Garcia, J., Sanner, B., Abry, M., & Karytsas, C. (2010). Development and Demonstration of Ground Coupled Heat Pumps of High Technology. In Proceedings World Geothermal Congress (pp. 25-29).*
8. Lourenço, M.C., and José Cruz, *Aproveitamentos geotérmicos em Portugal continental.* XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros, 26 a 29 2005.
9. Lindal, B.J., *Geothermal energy: Industrial and other applications of geothermal energy.* 1973: p. 135-148.
10. Carvalho, J.M. and M.R. Carvalho, *Recursos geotérmicos e seu aproveitamento em Portugal.* 2004.
11. *Lei n.º 54/2015 - Diário da República n.º 119/2015, Série I de 2015-06-22, Ato da Série I da Assembleia da República. .*
12. LORENÇO, C., MELO, Bernardo, ROSA, Carlos, ROSA, Diogo, Geotermia em Portugal Continental: Situação atual e novas oportunidades, 2010;.
13. Lourenço, C. *Recursos Geotérmicos Superficiais – estratégia e projeto de legislação*. in *VIII Jornadas APG*. 2019. FCUL, Lisboa.

14. Ponte, C.B.d. *Aproveitamentos Geotérmicos nos Açores*. 2019; Disponível em: http://siaram.azores.gov.pt/energia/geotermia/_texto1.html [Acedido em 27/05/2019].
15. BELO, J.P., *Estudo de uma bomba de calor.* 2013. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
16. Kavanaugh, S.P. and K.D. Rafferty, *Geothermal heating and cooling: design of ground-source heat pump systems*. 2014: ASHRAE Atlanta.
17. Handbook-Fundamentals, A.J.R.A.-C.E., *American society of Heating.* 2009.
18. *Self, Stuart J, Reddy, Bale V, Rosen, Marc A, Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options.* 2013. **101**: p. 341-348.
19. *SYNEGE. Dísponível em http://synege.pt/ [Acedido em 28/08/2019]*.
20. Lopes, H.L.S., *Sistemas geotérmicos de baixa entalpia estudos de caracterização térmica*. 2014.
21. Raposo, M., *Relatório de Projeto-Bombas de Calor Geotérmicas–Enquadramento e Perspetivas.* 2015.
22. *Oliveira, A. C. (2019) Apontamentos da Cadeira de Transferência de Calor - Permutadores de Calor: Tipos e classificação; diferença de temperatura média; aplicações. Texto não publicado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.*
23. Cengel, Y.A., S. Klein, and W. Beckman, *Heat transfer: a practical approach*. Vol. 141. 1998: McGraw-Hill New York.
24. Azevedo, J.L.T., *Apontamentos de Permutadores de Calor – Equipamentos Térmicos*. 2005
25. *Roriz, Luis, Climatização – Concepção, Instalação e Condução de Sistemas, 2ª Edição, Orion, Lisboa, 2006.*
26. Jesus, E.I., *Simulação do comportamento térmico de um edifício de serviços recorrendo ao software de simulação TRACE700.* 2010.
27. TRANE, *User's Manual -Trace 700 Building Energy and Economic Analysis*.
28. *RECS-QAI. (2013). Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) - Requisitos de Ventilação e Qualidade do Ar Interior. Lisboa: INCM. Portaria n.o 353-A/2013.*
29. *SCE (2006). Decreto-lei n.º 78/2006 de 4 de Abril. "Sistema de Certificação Energética".*
30. *Google Earth. Disponível: https://earth.google.com/web/@40.74592558,-6.94946531,550.44255292a,139.69885453d,35y,-0h,0t,0r. [Acedido em 25/09/2019]*.
31. *Lei n.º 85/2009. Diário da República – I Série - N.º 66 - de 3 de Abril de 2009.*
32. Aguiar, R., M. Carvalho, and H. Gonçalves, *Climatologia e anos meteorológicos de referência para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios (versão 2013).* 2013.
33. *Diário da República, 1ª série - N.º 207 - 22 de outubro de 2015. Portaria n.º 379/2015: Regulamento do Desempenho Energético dos Edifcícios de Habitação (REH) - Requisitos de conceção para edifício novos e intervenções.*
34. Santos, C. and L. Matias, *ITE 50-Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios.* 2006. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.

35. *RCCTE, D. (2006). Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril–Regulamento das Caraterísticas de Comportamento Térmico dos Edifícios–RCCTE.*

36. ASHRAE., *2005 ASHRAE Handbook: Fundamentals*. 2005: ASHRAE.

37. *e Climatizaçao, R. D. S. E. em Edificios (RSECE)—Decreto-Lei no. 79/2006. de 04/04/2006, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicaçoes, Portugal.*

38. Standard, A.J.A.S.o.H., Refrigerating and A.c. Engineers, *62.1,"Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality".* 2004.

39. *Perguntas e Respostas sobre o SCE; Agência para a Energia (ADENE); Novembro de 2008.*

40. REH, *DL 118/2013-Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação, Comércio e Serviços, Code of the energy performance of buildings (residential and commercial) Minist.* 2013: p. 4988-5005.

41. *ADENE - Agência para a energia. Nota Técnica NT-SCE-01: Método de cálculo simplificado para a certificação energética de edifícios existentes no âmbito do RCCTE. 2009.*

42. *ERSE. "Tarifas Transitórias de Venda a Clientes Finais em Portugal Continental". Disponível: https://www.edpsu.pt/pt/EDP%20Docs/Tarifas%20Transit%C3%B3rias%20n%C3%A3o%20BTN%202019.pdf. [Acedido em 02/08/2019].*

43. *Galp Energia - Comercialização Mercado Regulado: Fatura de gás natural. Disponível: http://www.galpenergia.com/PT/ProdutosServicos/GasNatural/Mercado-Regulado/Facturacao/Paginas/FacturaGasNatural.aspx [Acedido em 02/08/2019].*

44. *E.15; Perguntas e respostas RSECE – Energia de Novembro de 2008; ADENE.*

45. *BSR/ASHRAE Standard 209P, Energy Simulation Aided Design for Buildings except Low-Rise Residential Buildings, ASHRAE, Atlanta GA 30329-2305. March 2016. .*

46. *ASHRAE. 2014. Guideline 14-2014, Measurement of energy, demand, and water savings. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. .*

47. *Despacho (extrato) n.º 15793-D/2013. Direção-Geral de Energia e Geologia. 3 de Dezembro de 2013, Diário da República, 2.ª série, Vol. 234, p. 35088.*

48. *Diário da República, 1ª série. « Portaria nº 349-D/2013 de 2 de Dezembro de 2013. Regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços (RECS) - Requisitos de conceção para edifício novos e intervenções. 2013.*

49. *Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. DL 153/2014. Diário da República n.º 202/2014, Série I de 2014-10-20.*

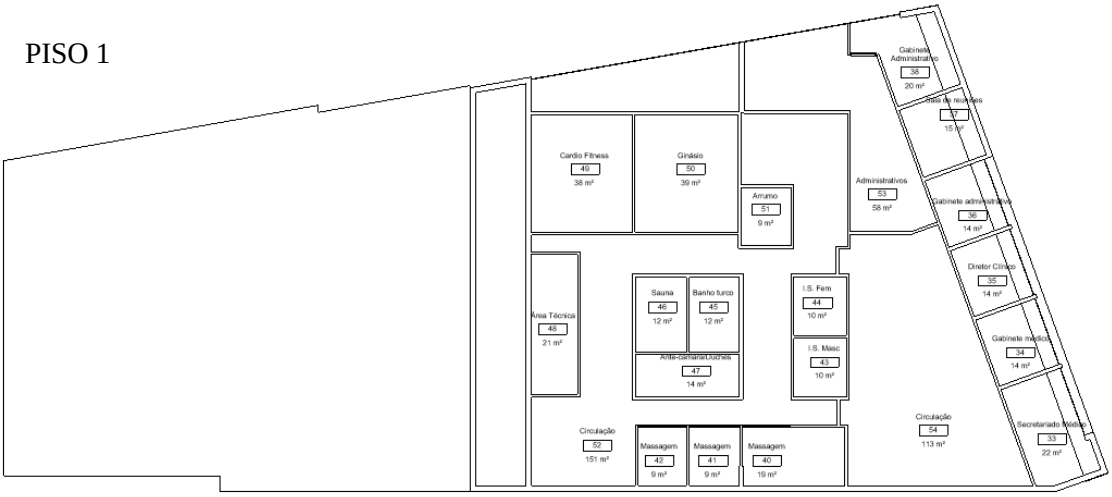
50. *Solaris. SolarWorld Sunmodule Plus SW280 MONO. Disponível: https://www.solaris-shop.com/solarworld-sunmodule-plus-sw280-mono-280w-solar-panel/ [Acedido em 01/09/2019].*

51. *Diário da República, 2ª série. 8 de Abril de 2008. Despacho n.º 10250/2008 - Modelo dos Certificados de Desempenho Energético e da Qualidade do Ar Interior. Emitidos no âmbito do SCE (D.L. 78/2006 de 4 de Abril). .*

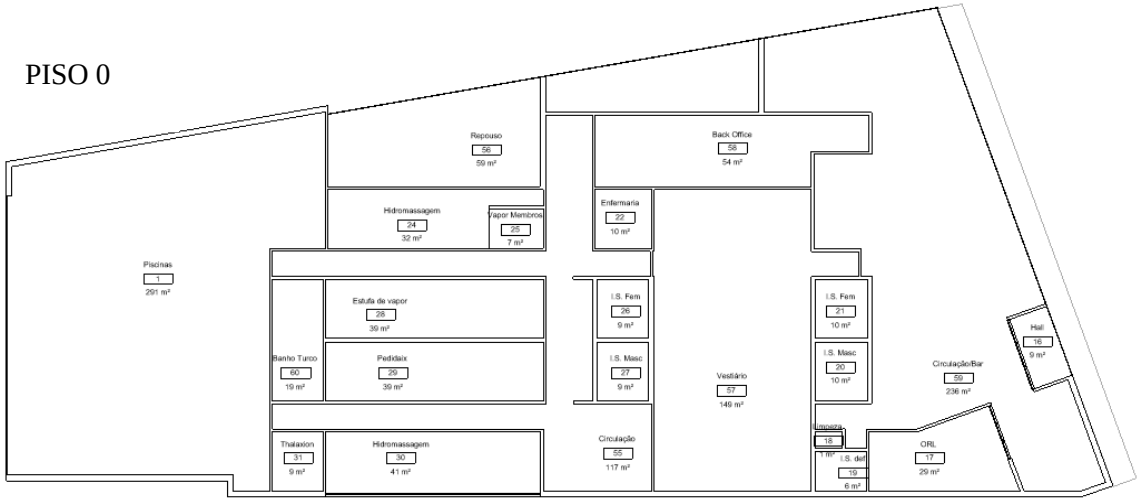
Anexos

Anexo A – Plantas do Edifício (*Software REVIT*)

PISO 1



PISO 0



PISO -1

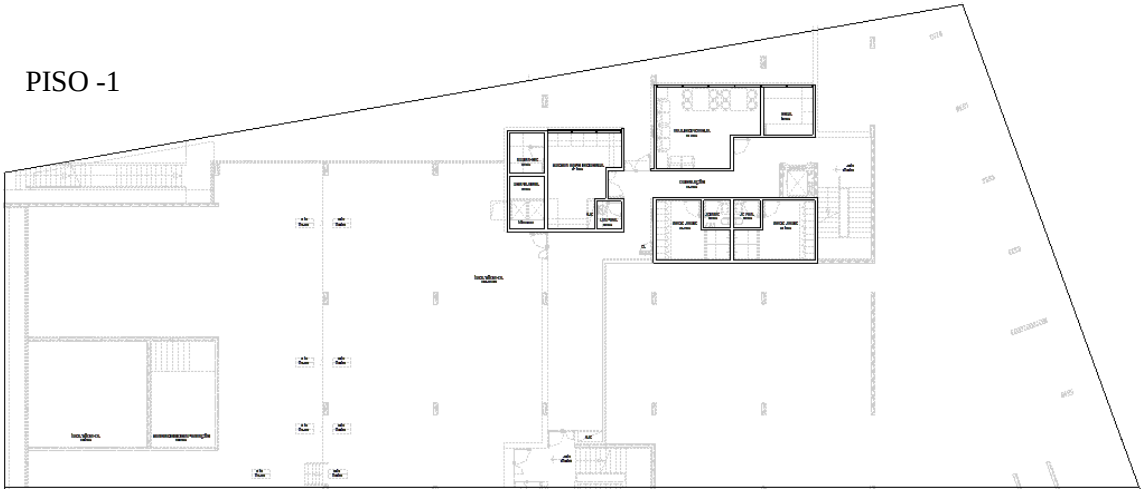


Figura A.1 - Plantas relativas aos 3 pisos do edifício (*software REVIT*).

Ɛ .

Anexo B – Cálculo dos Coeficientes de Transmissão Térmica (U)

B-1: Parede exterior (PE-1) e Parede em contacto com o solo (PSR-1)

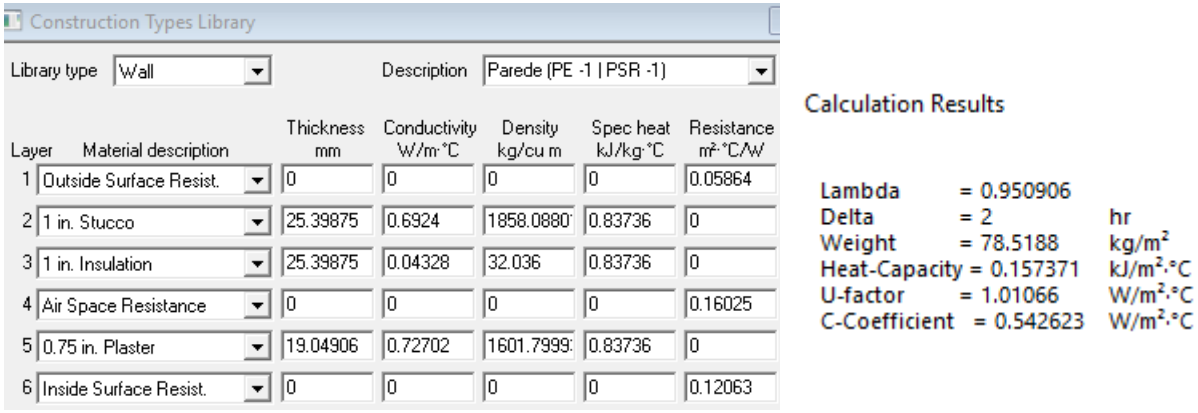


Figura B.1 - Cálculo do coeficiente de transmissão térmica das paredes do edifício.

B-2: Pavimento (PAV-1 e PAV-3)

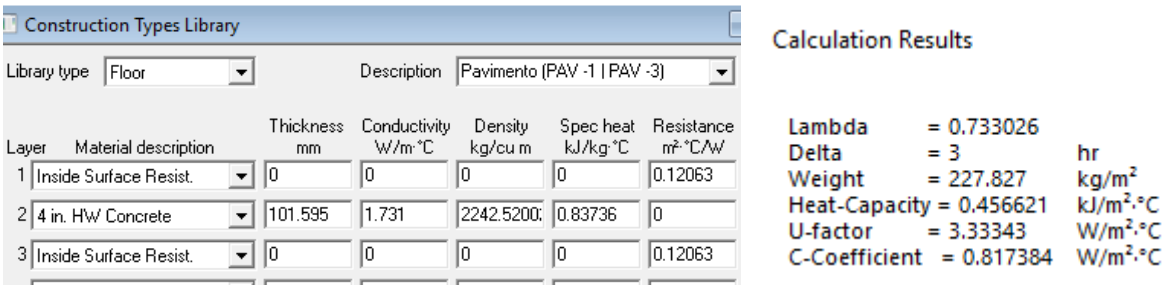


Figura B.2 - Cálculo do coeficiente de transmissão térmica do pavimento do edifício.

Anexo C – Cálculo da Inércia Térmica

Tabela C.1 - Requisitos das classes de inércia térmica interior de um edifício.

Classe de inércia térmica Interior	*Requisito*
Fraca	Caso se verifiquem cumulativamente as seguintes soluções: - Teto falso em todas as divisões ou pavimento de madeira ou esteira leve (cobertura) - Revestimento de piso do tipo flutuante ou pavimento de madeira; - Paredes de compartimentação interior em tabique ou gesso cartonado ou sem paredes de compartimentação;
Média	Caso não se verifiquem os requisitos necessários para se classificar a classe de inércia térmica em Forte ou Fraca
Forte	Caso se verifiquem cumulativamente as seguintes soluções, sem aplicação de isolamento térmico pelo interior: - Pavimento e teto de betão armado ou pré-esforçado; - Revestimento de teto em estuque ou reboco; - Revestimento de piso cerâmico, pedra, parquet, alcatifa tipo industrial sem pelo, com exclusão de soluções de pavimentos flutuantes; - Paredes interiores de compartimentação em alvenaria com revestimentos de estuque ou reboco; - Paredes exteriores de alvenaria com revestimentos interiores de estuque ou reboco; - Paredes da envolvente interior (caixa de escadas, garagem…) em alvenaria com revestimentos interiores de estuque ou reboco.

Anexo D – Perfis de utilização do Edifício

D.1 - Ocupação

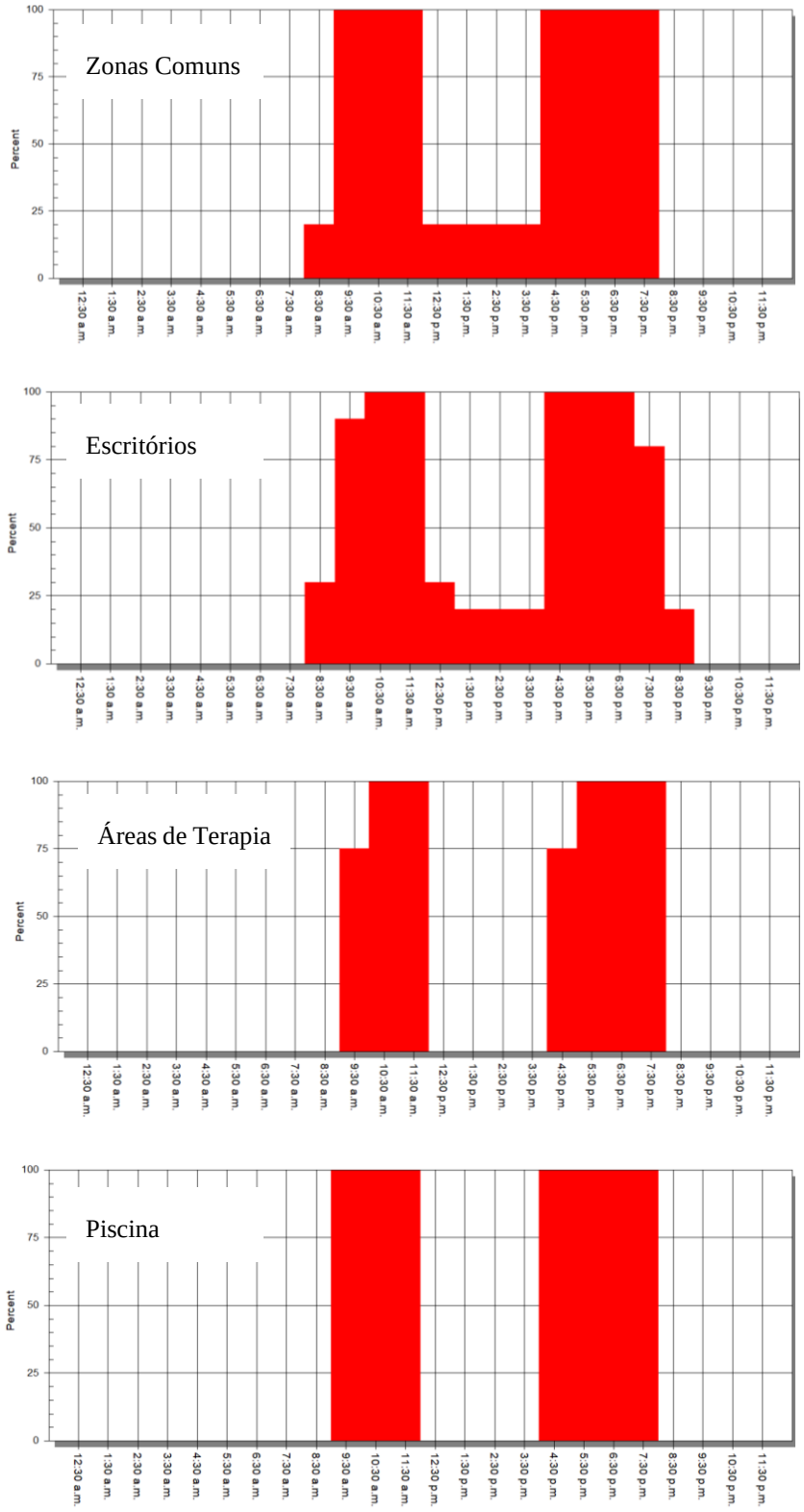


Figura D.1 - Perfis de Ocupação relativos às Termas de Fonte Santa.

D.2 - Iluminação

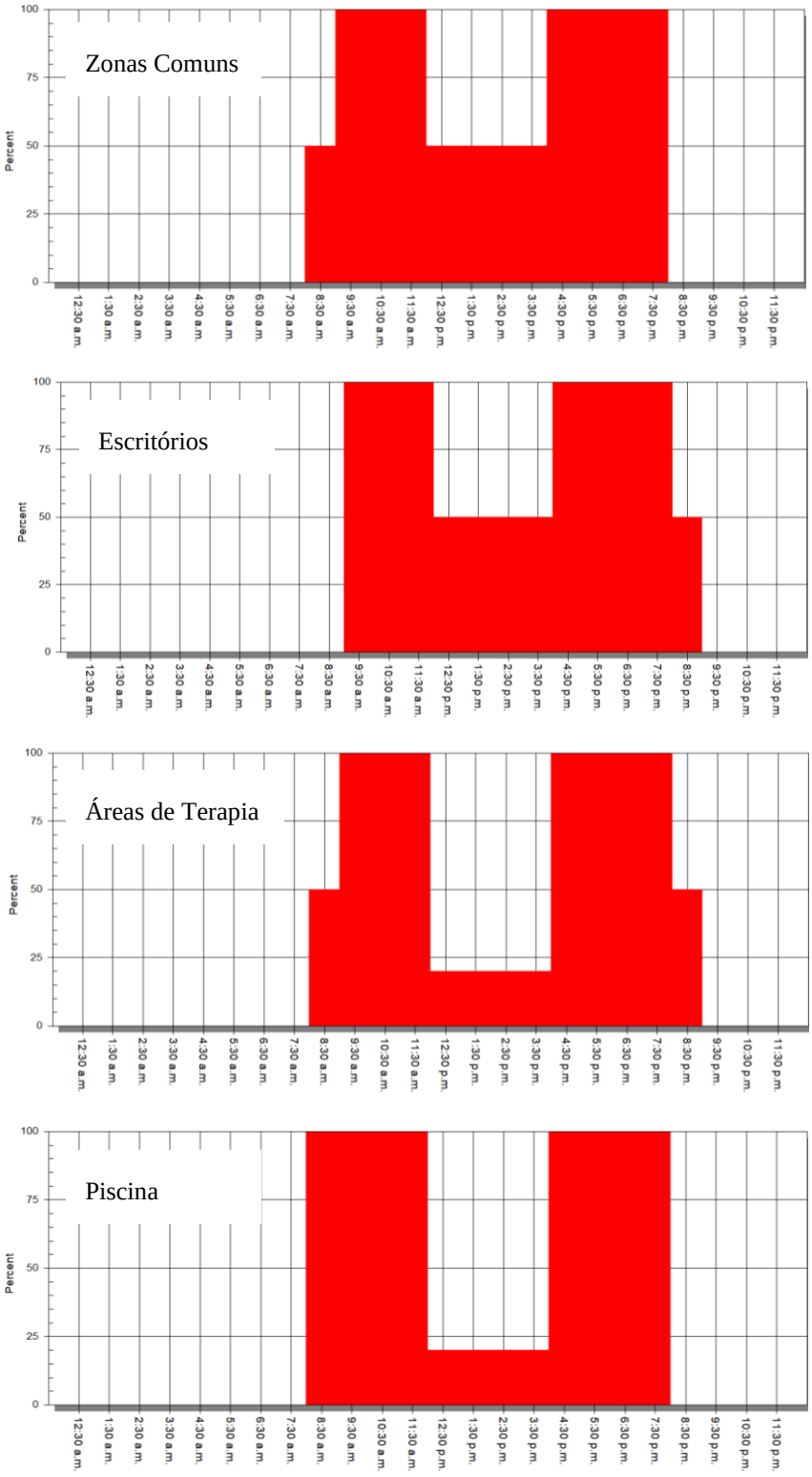


Figura D.2 - Perfis de Iluminação relativos às Termas de Fonte Santa.

D.3 - Equipamentos

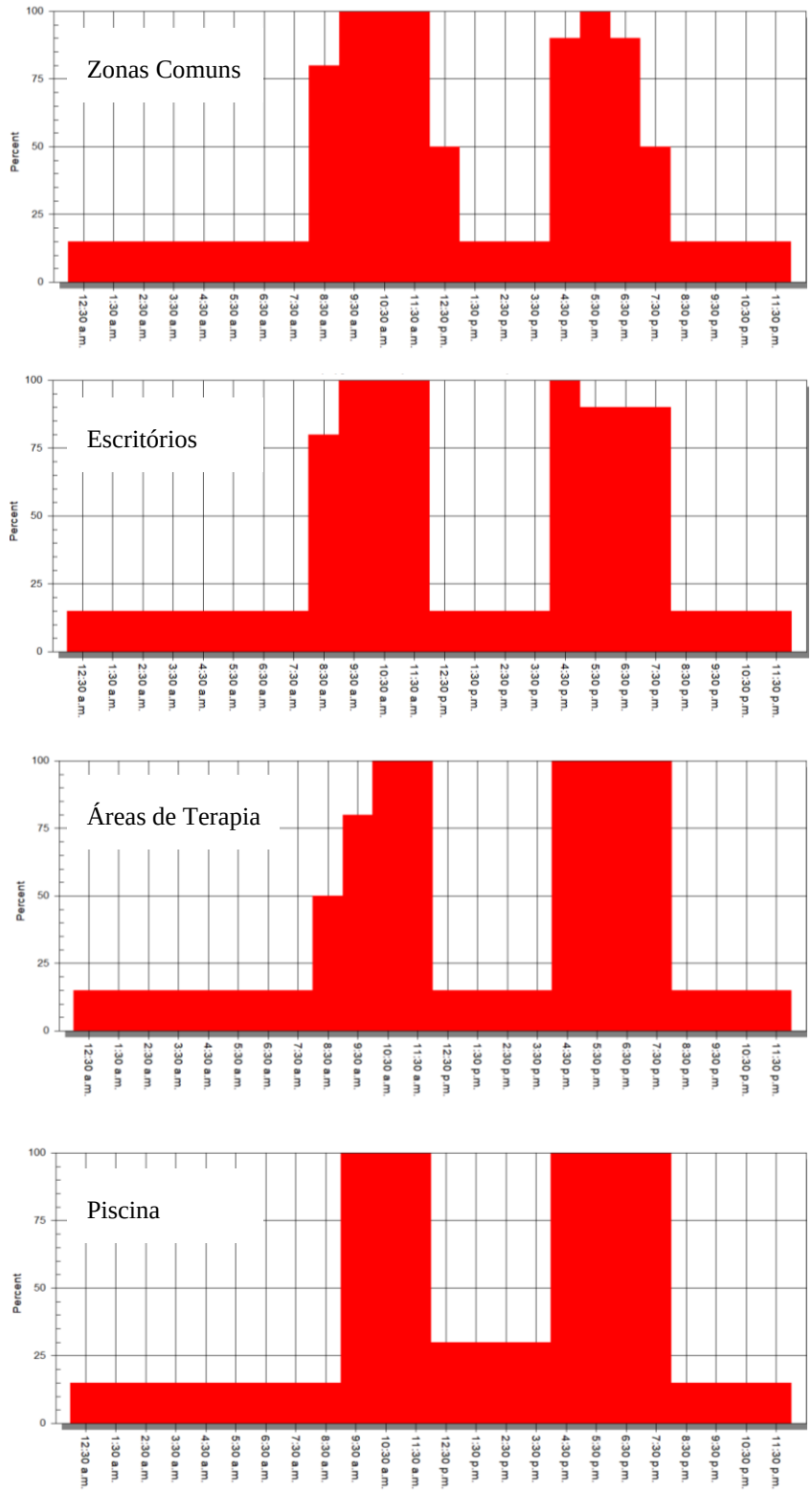


Figura D.3 - Perfis de Equipamentos relativos às Termas de Fonte Santa.

Anexo E – Levantamento dimensional por sistema de climatização

Tabela E.1 - Levantamento dimensional do edifício compartimentos e respetivas zonas de climatização.

PISO	*COMPARTIMENTO*	*Área [m2]*
-1	**UTV 1 – Piso -1**	
	Arrumos	8,90
	Roupa Suja	6,00
	Tratamento de Roupa	17,70
	Limpeza	2,90
	Sala de Pessoal	22,10
	Copa	7,40
	Vestiário Serviço Masc	10,40
	Vestiário Serviço Fem	11,70
0	**UDP**	
	Piscina	291
	UTV 2 - TRATAMENTOS	
	Thalaxion	9,40
	Hidromassagem 1	40
	Pedidaix	40
	Estufa de vapor	40
	Vapor Membros	6,40
	Hidromassagem 2	30
	Duche Lombar	12,70
	UTV 3 - Balneários	
	Balneário	182,60
	Back Office	32
	Enfermaria	9,40
	Limpeza	1,50
	UTV 3 + VC	
	Repouso	50,20
	ORL	26,30
	UTA 4 - Entrada	
	Circulação/Bar	242,30

PISO	*COMPARTIMENTO*	*Área [m2]*
1	**UTA 4 – Entrada**	
	Circulação - 54	70,50
	UTV 5 – MASSAGENS	
	Sauna	11,55
	Banho Turco	11,55
	Antecâmara/Duches	13,70
	Massagem 1	9,40
	Massagem 2	9,40
	Massagem 3	19,20
	Repouso	19,40
	Área Técnica	21
	VAN 5 – Escritórios	
	Secretariado Médico	19,80
	Gabinete Médico	14
	Diretor Clínico	14
	Gabinete Administrativo	14
	Sala Reuniões	14
	Gabinete Administrativo	14
	Administração/Receção	58,70
	Arrumo	9,00
	VAN 5 – Fitness	
	Ginásio	40,40
	Cardio Fitness	40,40

Anexo F – Ventiloconvectores

Tabela F.1 - Ventiloconvectores existentes no edifício e respetivas características.

	TIPO	ARREFECIMENTO (kW)	AQUECIMENTO (kW)	AR TRATADO ($\mathbf{m^3/h}$)	AR NOVO ($\mathbf{m^3/h}$)
VC-1	Ligação a condutas	10	10	2000	1000
VC-2	Ligação a condutas	16	16	2000	1000
VC-3	Ligação a condutas	15	15	3600	1800
VC-4	Ligação a condutas	10	10	1500	500
VC-5	Horizontal de tecto	4	4		
VC-6	Horizontal de tecto	4	4		
VC-7	Horizontal de tecto	4	4		
VC-8	Horizontal de tecto	3	3		
VC-9	Horizontal de tecto	3	3		
VC-10	Horizontal de tecto	3	3		
VC-11	Horizontal de tecto	3	3		
VC-12	Horizontal de tecto	4	4		
VC-13	Horizontal de tecto	2,5	2,5		
VC-14	Horizontal de tecto	2,5	2,5		
VC-15	Horizontal de tecto	2,5	2,5		

Tabela F.2 - Ventiladores de ar novo (VAN) existentes no edifício e respetivas características.

	TIPO	FILTROS	AN [m^3/h]	PE [Pa]
VAN - 5	Centrífugo em caixa insonorizada	G4	2700	200

Anexo G – Perfil AQS

Tabela G.1 - Perfil de águas quentes sanitárias (AQS) do edifício: dia da semana (à esquerda) e sábado (à direita).

PERFIL DIA DA SEMANA

HORA	utilização	Litros
00:00	0%	0,00
01:00	0%	0,00
02:00	0%	0,00
03:00	0%	0,00
04:00	0%	0,00
05:00	0%	0,00
06:00	0%	0,00
07:00	20%	215,00
08:00	50%	537,50
09:00	80%	860,00
10:00	80%	860,00
11:00	80%	860,00
12:00	50%	537,50
13:00	20%	215,00
14:00	20%	215,00
15:00	20%	215,00
16:00	80%	860,00
17:00	80%	860,00
18:00	80%	860,00
19:00	80%	860,00
20:00	20%	215,00
21:00	0%	0,00
22:00	0%	0,00
23:00	0%	0,00
TOTAL		8 170,00

PERFIL SÁBADO

HORA	utilização	Litros
00:00	0%	0,00
01:00	0%	0,00
02:00	0%	0,00
03:00	0%	0,00
04:00	0%	0,00
05:00	0%	0,00
06:00	0%	0,00
07:00	20%	215,00
08:00	50%	537,50
09:00	90%	967,50
10:00	90%	967,50
11:00	90%	967,50
12:00	50%	537,50
13:00	20%	215,00
14:00	20%	215,00
15:00	20%	215,00
16:00	100%	1 075,00
17:00	100%	1 075,00
18:00	100%	1 075,00
19:00	100%	1 075,00
20:00	20%	215,00
21:00	0%	0,00
22:00	0%	0,00
23:00	0%	0,00
TOTAL		9 352,50

Tabela G.2 - Consumo AQS do edifício.

Litros/hora	1075
Litros/segundo	0,30

Anexo H – Dados Climáticos da Região Almeida

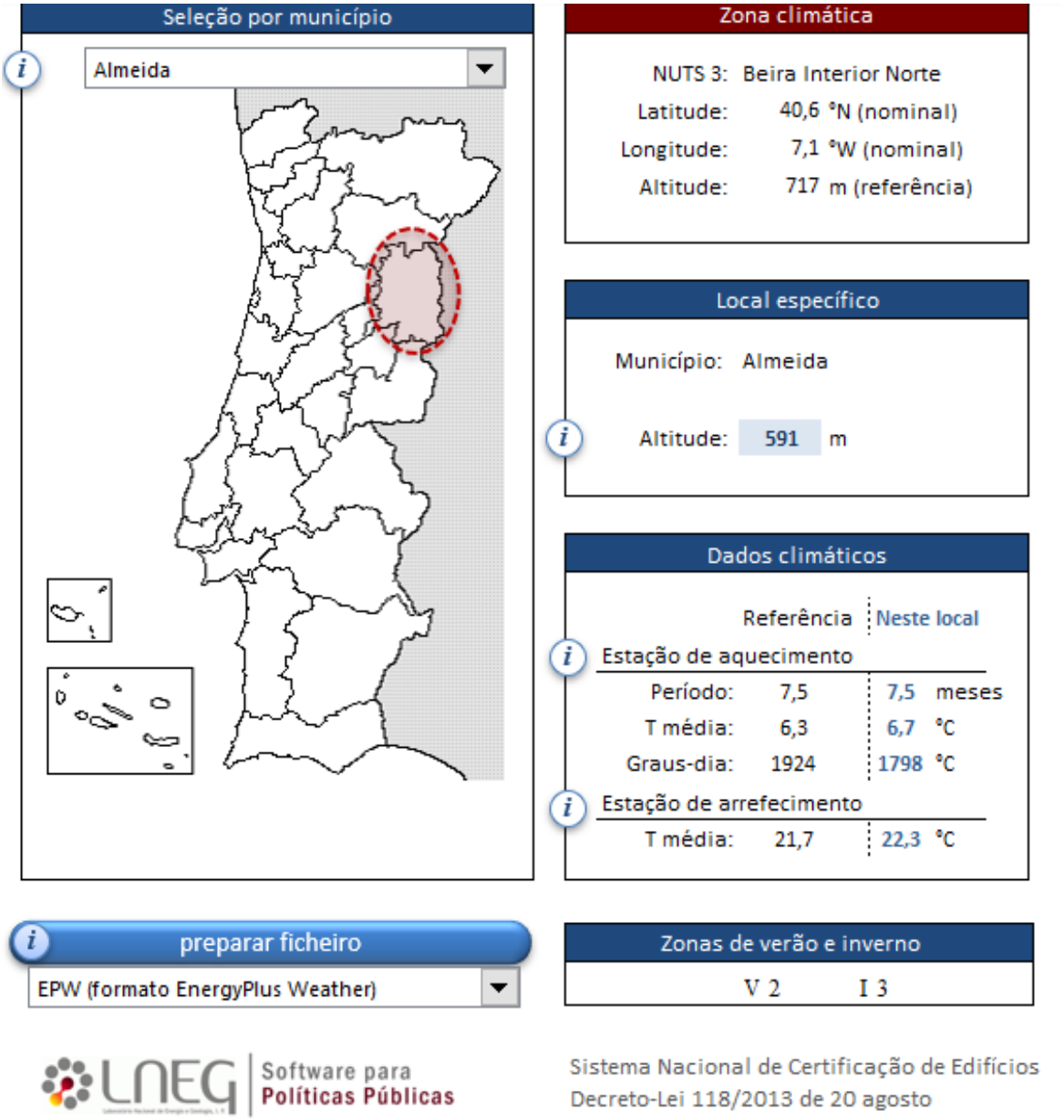


Figura H.1 - Ficheiro climático com os dados para as 8760 horas anuais, relativos ao município de Almeida (gerado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia, LNEG).

Anexo I – Faturas Energéticas

Tabela I.1 - Fatura da energia: energia elétrica relativa ao ano 2017 (fornecida na memória descritiva e justificativa do projeto).

DATAS	CONSUMO [kWh]	FATURADO [€ s/ IVA]	FATURADO [€ c/ IVA]
31/12/2016-25/01/2017	2426	360,02 €	442,83 €
26/01/2017-25/02/2017	3358	473,93 €	582,93 €
26/02/2017-25/03/2017	2834	420,15 €	516,79 €
26/03/2017-25/04/2017	2997	439,06 €	540,04 €
26/04/2017-25/05/2017	11428	1 324,28 €	1 628,86 €
26/05/2017-25/06/2017	33955	3 575,77 €	4 398,20 €
26/06/2017-25/07/2017	35157	3 771,54 €	4 639,00 €
26/07/2017-25/08/2017	39611	4 251,02 €	5 228,75 €
26/08/2017-25/09/2017	32387	3 470,05 €	4 268,16 €
26/09/2017-25/10/2017	27641	3 008,98 €	3 701,04 €
26/10/2017-25/11/2017	23848	2 532,54 €	3 115,02 €
26/11/2017-25/12/2017	3200	478,07 €	588,03 €
26/09/2017-25/01/2018	2878	419,79 €	516,34 €
Total	**218842**	**24 105,41 €**	**30 165,99 €**

Tabela I.2 - Fatura de energia: gás natural relativa ao ano 2017 (fornecida na memória descritiva e justificativa do projeto).

DATAS	CONSUMO [kWh]	FATURADO [€ s/ IVA]	FATURADO [€ c/ IVA]
02/02/2017	40499,28	3515,00	4323,45
20/02/2017	29628,56	2429,49	2988,27
10/06/2017	60009,50	5336,74	6564,19
09/08/2017	65976,72	4892,51	6017,79
05/09/2017	64471,94	4780,92	5880,53
24/09/2017	66651,28	5229,93	6432,81
18/10/2017	20548,00	1612,34	1983,18
23/10/2017	36270,33	2846,02	3500,60
11/11/2017	102804,86	8066,79	9922,15
Total	**486860,47**	**38709,73**	**47612,97**

Anexo J – Consumos Energéticos por utilização final da Solução Existente: *TRACE 700*

Note: The percentage displayed for the "Proposed/ Base %" column of the base case is actually the percentage of the total energy consumption. * Denotes the base alternative for the ECB study.		* Alt-1 1 ‖ versÒo edificio terma		
		Energy 10^3 kWh/yr	Proposed / Base %	Peak kW
Lighting - Conditioned	Electricity	33.8	4.3	23
Lighting - Unconditioned	Electricity	11.2	1.4	7
Space Heating	Electricity	15.7	2.0	2
	Gas	486.8	61.4	242
Space Cooling	Electricity	58.4	7.4	70
Pumps	Electricity	14.8	1.9	2
Heat Rejection	Electricity	5.2	0.7	6
Fans - Conditioned	Electricity	34.6	4.4	11
Fans - Unconditioned	Electricity	1.7	0.2	1
Receptacles - Conditioned	Electricity	35.0	4.4	13
	Purchased Hot Water	89.5	11.3	15
Receptacles - Unconditioned	Electricity	6.2	0.8	2
Total Building Consumption		**793.0**		

Figura J.1 - Relatório gerado em TRACE 700: consumos energéticos por utilização final (solução existente).

Anexo K – Ficha técnica: Permutadores de Calor em Modo Arrefecimento (Solução A)

Brazed Plate Heat Exchanger

Technical specification

Modelo : CB110-64H (32871 0156 0)
Project : Projecto Geotermia — Unidades : 1
ItemName : Aquecimento DT10 30kPA — Data : 16/07/2019

		Lado Quente S4S3	Lado frio S2S1
Fluído		Água	Água
Densidade	kg/m³	990.7	992.4
Capacidade calorífica específica	kJ/(kg*K)	4.18	4.18
Conductividade Térmica	W/(m*K)	0.631	0.625
Viscosidade na entrada	cP	0.596	0.801
Viscosidade na saída	cP	0.721	0.642
Volume flow rate	m³/h	13.3	12.0
Temperatura de entrada	°C	45.0	30.0
Temperatura de saída	°C	35.0	41.0
Perda de carga	kPa	22.8	18.2
Calor Trocado	kW	152.6	
L.M.T.D.	K	4.5	
Coef. Transf. Calor Limpo	W/(m²*K)	5352	
Coef. Transf. Calor Serviço	W/(m²*K)	4909	
Área de Transferência de Calor	m²	6.94	
Fouling resistance*10000	m²*K/W	0.000	
Margem	%	9.00	
Direcção relativa dos fluídos		Contra-corrente	
Número de passagens		1	1
Materialplate/ brazing		Alloy 316 / Cu	
LigaçãoS1 (Cold-Saída) 316		Threaded (External)/ 2" ISO 228/1-G (B23) Alloy	
LigaçãoS2 (Cold-Entrada) 316		Threaded (External)/ 2" ISO 228/1-G (B23) Alloy	
LigaçãoS3 (Hot-Saída) 316		Threaded (External)/ 2" ISO 228/1-G (B23) Alloy	
LigaçãoS4 (Hot-Entrada) 316		Threaded (External)/ 2" ISO 228/1-G (B23) Alloy	
Código de pressão		PED	
Pressão de projecto at 90.000000 Celsius	Bar	30.0	30.0
Pressão de projecto at 225.000000 Celsius	Bar	25.0	25.0
Temperatura de projecto	°C	-196.0/225.0	
Comprimento total x largura x altura	mm	242 x 191 x 616	
Peso líquido, vazio/ operação	kg	28.8 / 41.9	
Package length x width x height	mm	270 x 780 x 270	
Package weight	kg	7.500	

Price RCPL incl Extras
-Unit 32871 0156 0

Quant.	Peça / Refª	Descrição	Preço Unit.	TOTAL
		Aquecimento ΔT10		
1	30kPA	CB110-64H	2.184,46 €	2.184,46 €
1	50kPA	CB110-54H	1.989,26 €	1.989,26 €
			TOTAL	**9.796,07 €**

Figura K.1 - Características técnicas do permutador selecionado para a solução A (apenas em modo arrefecimento) e respetivo preço do equipamento.

Anexo L – Ficha Técnica Chiller (para solução B)

WAMAK

WW 150 SHR HD Modul

Technical information - heat pump			
Type :	WW 150 SHR HD Modul	latest data update :	2017-11-23 15:22:00
Article code :	WAMO1409	Language :	English

Nominal performance data according to EN 14511			
Heating capacity :	110.00 kW	Input :	26.19 kW
Refrigerating capacity :	83.81 kW	COP :	4.2
* Data at conditions W30°C/W70°C			

Operating temperature limitations			
Source temperature minimal :	-5ºC	Flow temperature minimal :	+20ºC
Source temperature maximal :	+45ºC	Flow temperature maximal :	+82ºC

Mechanical data			
Width :	mm	Weight inside :	630 kg
Depth :	mm		
Height :	mm		

Noise emissions			
Noise emissions inside Lp (1m) :	54 dB(A)		

Refrigerant circle parameters			
Refrigerant :	R134a	Orifice inside :	EEV
Refrigerant volume :	34 kg		

Pipe dimensions, flow rates , pressure drops			
Connecting dimensions – primary side :	2.1/2 "	Pressure drop – primary side :	max 20 kPa
Connecting dimensions – secondary side :	2.1/2 "	Pressure drop – secondary side :	max 20 kPa
Flow – primary side :	24.17 m³/hour	Recommended ΔT source :	3 K
Flow – secondary side :	13.60 m³/hour	Recommended ΔT consumer :	7 K

Electrical parameters			
Main connection cable – dimension :	5x10 mm²	Current – nominal :	43.42 A
Primary side cable – dimension :	5x2.5 mm²	Current – maximal :	62.90 A
Voltage :	3 x 400 V	Softstart :	MCD 201
Fuze :	63 A	Starting current :	117.23 A

Features			
Condenser circulator installed :	No	Installed HP controller :	SIEMENS RVS 21
Source circulator installed :	No	Control of mixed heating circuit :	Yes
Bivalent heater installed :	No	Control of direct pump heating circuit :	Yes
Three way switching valve in delivery :	No	Active cooling :	optional

Figura L.1 - Ficha técnica do chiller/bomba de calor consultado para solução B.

WAMAK

WW 150 SHR HD Modul

Source	Heating capacity / flow temperature (kW)			Power input / flow temperature (kW)			COP / flow temperature (-)		
ºC	60	70	80	60	70	80	60	70	80
40	158,22	144,80	131,89	22,42	26,75	32,36	7,06	5,41	4,08
39	153,79	140,87	128,45	22,32	26,69	32,31	6,89	5,28	3,98
38	149,48	137,05	125,11	22,23	26,62	32,27	6,73	5,15	3,88
37	145,27	133,33	121,87	22,13	26,56	32,22	6,56	5,02	3,78
36	141,18	129,71	118,71	22,05	26,51	32,18	6,40	4,89	3,69
35	137,20	126,19	115,65	21,96	26,45	32,13	6,25	4,77	3,60
34	133,32	122,76	112,67	21,88	26,40	32,09	6,09	4,65	3,51
33	129,55	119,43	109,78	21,81	26,34	32,04	5,94	4,53	3,43
32	125,88	116,20	106,97	21,73	26,29	32,00	5,79	4,42	3,34
31	122,31	113,06	104,24	21,66	26,24	31,95	5,65	4,31	3,26
30	118,84	110,00	101,59	21,60	26,19	31,90	5,50	4,20	3,18
29	115,47	107,03	99,01	21,53	26,14	31,85	5,36	4,09	3,11
28	112,19	104,15	96,52	21,47	26,09	31,79	5,22	3,99	3,04
27	109,00	101,35	94,09	21,41	26,04	31,74	5,09	3,89	2,96
26	105,90	98,62	91,74	21,36	25,99	31,68	4,96	3,79	2,90
25	102,89	95,98	89,45	21,30	25,94	31,62	4,83	3,70	2,83
24	99,97	93,41	87,23	21,25	25,89	31,56	4,71	3,61	2,76
23	97,13	90,92	85,08	21,19	25,84	31,49	4,58	3,52	2,70
22	94,38	88,50	82,99	21,14	25,79	31,42	4,46	3,43	2,64
21	91,70	86,15	80,96	21,09	25,73	31,35	4,35	3,35	2,58
20	89,10	83,87	78,99	21,04	25,68	31,27	4,24	3,27	2,53
19	86,57	81,66	77,07	20,99	25,62	31,19	4,13	3,19	2,47
18	84,12	79,50	75,21	20,94	25,56	31,10	4,02	3,11	2,42
17	81,75	77,42	73,40	20,88	25,50	31,01	3,91	3,04	2,37
16	79,44	75,39	71,64	20,83	25,43	30,91	3,81	2,96	2,32
15	77,19	73,41	69,93	20,78	25,36	30,81	3,71	2,89	2,27
14	75,02	71,50	68,27	20,73	25,29	30,70	3,62	2,83	2,22
13	72,90	69,64	66,65	20,67	25,21	30,59	3,53	2,76	2,18
12	70,85	67,82	65,07	20,62	25,13	30,47	3,44	2,70	2,14
11	68,86	66,06	63,53	20,56	25,05	30,35	3,35	2,64	2,09
10	66,92	64,35	62,03	20,50	24,96	30,22	3,27	2,58	2,05
9	65,04	62,68	60,57	20,43	24,87	30,08	3,18	2,52	2,01
8	63,22	61,06	59,13	20,37	24,77	29,94	3,10	2,46	1,98
7	61,44	59,47	57,74	20,30	24,67	29,78	3,03	2,41	1,94
6	59,71	57,93	56,37	20,23	24,57	29,62	2,95	2,36	1,90
5	58,03	56,42	55,02	20,15	24,45	29,46	2,88	2,31	1,87

Figura L.2 - Temperaturas de funcionamento do chiller/bomba de calor consultado para solução B e respetivas potências de aquecimento e COP do equipamento.

Anexo M – Ficha técnica módulo fotovoltaico

Sunmodule® Plus
SW 280-290 MONO BLACK (5-busbar)

SOLARWORLD
REAL VALUE

PERFORMANCE UNDER STANDARD TEST CONDITIONS (STC)*

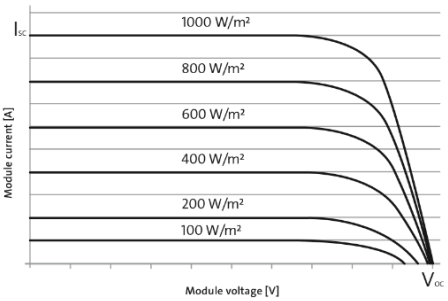
		SW 280	SW 285	SW 290
Maximum power	P_{max}	280 Wp	285 Wp	290 Wp
Open circuit voltage	V_{oc}	39.5 V	39.7 V	39.9 V
Maximum power point voltage	V_{mpp}	31.2 V	31.3 V	31.4 V
Short circuit current	I_{sc}	9.71 A	9.84 A	9.97 A
Maximum power point current	I_{mpp}	9.07 A	9.20 A	9.33 A
Module efficiency	η_m	16.70 %	17.00 %	17.30 %

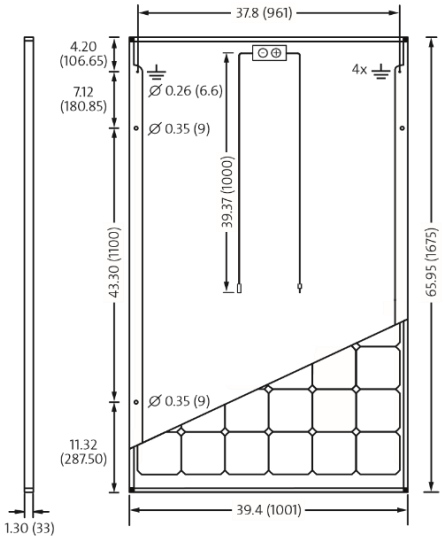
*STC: 1000W/m², 25°C, AM 1.5

PERFORMANCE AT 800 W/M², NOCT, AM 1.5

		SW 280	SW 285	SW 290
Maximum power	P_{max}	207.2 Wp	211.1 Wp	215 Wp
Open circuit voltage	V_{oc}	35.8 V	36.0 V	36.2 V
Maximum power point voltage	V_{mpp}	28.3 V	28.4 V	28.5 V
Short circuit current	I_{sc}	7.85 A	7.96 A	8.06 A
Maximum power point current	I_{mpp}	7.33 A	7.43 A	7.54 A

Minor reduction in efficiency under partial load conditions at 25° C: at 200 W/m², 100% of the STC efficiency (1000 W/m²) is achieved.





All units provided are imperial. SI units provided in parentheses.
SolarWorld AG reserves the right to make specification changes without notice.

COMPONENT MATERIALS

Cells per module	60	*Front*	Low-iron empered glass with ARC (EN 12150)
Cell type	Mono crystalline 5-busbar	*Frame*	Black anodized aluminum
Cell dimensions	6.17 in x 6.17 in (156.75 x 156.75 mm)	*Weight*	39.7 lbs (18.0 kg)

THERMAL CHARACTERISTICS

NOCT	48°C
TCI_{sc}	0.044 %/C
TCV_{oc}	-0.31 %/C
TCP_{mpp}	-0.43 %/C
Operating temp	-40 to +85 °C

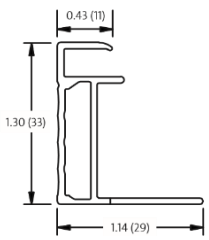
ADDITIONAL DATA

Power sorting	-0 Wp/+5 Wp
J-Box	IP65
Connector	PV wire per UL4703 with H4/UTX connectors
Module fire performance	(UL 1703) Type 1

PARAMETERS FOR OPTIMAL SYSTEM INTEGRATION

Maximum system voltage SC II / NEC		1000 V
Maximum reverse current		25 A
Number of bypass diodes		3
*Design loads**	*Two rail system*	113 psf downward, 64 psf upward
*Design loads**	*Three rail system*	178 psf downward, 64 psf upward
*Design loads**	*Edge mounting*	178 psf downward, 41 psf upward

* Please refer to the Sunmodule installation instructions for the details associated with these load cases.



- Compatible with both "Top-Down" and "Bottom" mounting methods
- ⏚ Grounding Locations:
  – 4 locations along the length of the module in the extended flange.

SW-01-7515US 160311

Figura M.1 - Ficha técnica dos módulos fotovoltaicos (Sunmodule Plus SW 280 Monoblack).

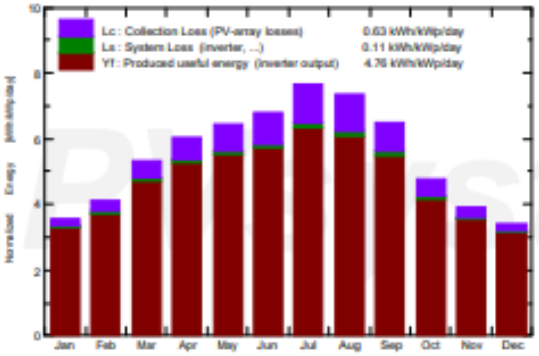
Anexo N – Resultados da simulação do sistema fotovoltaico (*PVsyst*)

Main simulation results

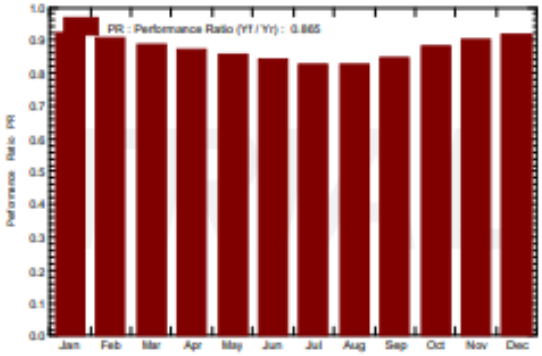
System Production — **Produced Energy** **42.78 MWh/year** Specific prod. 1736 kWh/kWp/year

Performance Ratio PR 86.52 %

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 24.64 kWp



Performance Ratio PR



New simulation variant

Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	63.9	26.89	6.10	110.3	107.5	2.567	2.511	0.923
February	79.3	35.96	7.30	114.7	111.8	2.622	2.564	0.908
March	131.6	51.22	9.77	165.3	161.0	3.696	3.617	0.888
April	165.5	52.97	10.56	181.2	176.3	3.973	3.884	0.870
May	206.0	70.68	14.22	199.6	193.1	4.302	4.207	0.856
June	219.5	67.28	18.39	203.8	196.8	4.319	4.222	0.841
July	250.1	52.86	19.72	237.2	229.6	4.943	4.833	0.827
August	217.2	48.65	20.60	228.6	222.2	4.754	4.652	0.826
September	158.4	47.10	17.74	194.6	189.6	4.156	4.067	0.848
October	105.6	41.34	13.73	147.5	143.7	3.271	3.199	0.880
November	71.2	27.11	8.55	117.7	114.9	2.680	2.621	0.904
December	57.2	21.50	6.42	106.1	103.5	2.453	2.398	0.917
Year	1725.6	543.57	12.79	2006.5	1950.0	43.736	42.775	0.865

Legends: GlobHor Horizontal global irradiation — GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings

DiffHor Horizontal diffuse irradiation — EArray Effective energy at the output of the array

T_Amb Ambient Temperature — E_Grid Energy injected into grid

GlobInc Global incident in coll. plane — PR Performance Ratio

Figura M.2 - Resultados da simulação do sistema fotovoltaico (*software PVsyst*).