

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO  
PORTO**

**Avaliação de Soluções de Climatização  
aplicadas na Hotelaria para atingir a  
classificação nZEB**

**Maria Clara Sequeira Braamcamp de Mancelos**



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor José Luís Alexandre

Co-orientador: Engenheiro José Barroso

17 de Abril de 2020



# **Avaliação de Soluções de Climatização aplicadas na Hotelaria para atingir a classificação nZEB**

**Maria Clara Sequeira Braamcamp de Mancelos**

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica



# Resumo

O aumento da utilização de energia nos edifícios, e o conseqüente aumento das emissões de CO<sub>2</sub> conduz à necessidade de conceber e implementar legislação que visa limitar este aumento. A União Europeia publicou uma diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios que obriga que todos os edifícios novos a partir de 2020 tenham necessidades quase nulas de energia (nZEB).

No âmbito deste projeto, foram analisadas várias soluções primárias de climatização para possível implementação num complexo hoteleiro que será sujeito a uma grande renovação, com o objetivo de o tornar num nZEB. Nesse sentido, analisou-se o potencial climático da zona de Porto Santo, de forma a identificar dois sistemas primários de climatização que poderiam ser benéficos na diminuição dos consumos de energia do edifício em estudo. Este edifício tem a particularidade de ter o uso hoteleiro normal, associado a piscinas de tratamento de Talassoterapia, (sistema com água salgada).

Para além do sistema a ser implementado (denominado de sistema clássico) foram simulados no TRNSYS um sistema com bombas de calor, assim como um sistema de trigeriação, ambos associados a uma caldeira auxiliar para a produção de água quente. Os dados base utilizados no TRNSYS foram as necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento dos espaços, sendo que os outros parâmetros e grandezas necessários foram calculados. Assim, foi possível modelizar os três sistemas, associados a um campo de coletores solares para produção de água quente, e determinar os dados dos respetivos consumos.

Foi realizada uma comparação de consumo total de energia primária, verificando-se que o sistema com trigeriação foi o mais eficiente (com uma diminuição de 31% face ao clássico). Porém, quando analisadas as emissões de CO<sub>2</sub>, o sistema que revelou oferecer a melhor solução foi o das bombas de calor (com uma diminuição de 17% face ao clássico).

Dada a singularidade do edifício, e do clima, resultante do uso energético intenso associado às piscinas, foi feita uma análise ao consumo energético do edifício sem as piscinas, tendo-se determinado o balanço de energia primária por área útil previsto para esse espaço ( $IEE_{pr}$ ). Não dispondo de valores de referência, não foi possível determinar a classe energética associada a nenhuma das soluções, mas foi possível verificar diminuições significativas deste valor, e correspondente aumento de eficiência, para as configurações das bombas de calor e trigeriação (61,5% e 52,6% respetivamente) face ao sistema clássico.

Por fim, foi feita a análise ao edifício completo, utilizando o RECS, por isso, os dados do edifício de referência. Foi possível verificar que o edifício com o sistema energético das bombas de calor se comportava como um nZEB, obtendo uma classificação energética A, com um rácio de classe energética ( $R_{IEE}$ ) de 0,48. As outras configurações estão próximas, obtendo a classificação B ( $R_{IEE}$  de 0,70 para o sistema clássico e 0,67 para a trigeriação).

Avaliação de Soluções de Climatização aplicadas na Hotelaria para atingir a classificação nZEB

Concluiu-se que, com o sistema energético das bombas de calor, é possível atingir a classificação nZEB para o edifício em estudo.

# Abstract

The increase of energy consumption in buildings and the consequent rise of the CO<sub>2</sub> emissions leads to the urge of creating and implementing legislation that can contain this growth. The European Union published a directive related to the energy performance of the buildings, and forces all new buildings to have near zero energy needs (nZEB), from 2020 onward.

A hotel complex located in Porto Santo will undergo a major renewal. In this regard, under this project, several energy solutions were studied, in order to turn this building into a nZEB. In that manner, the Porto Santo's climatic potential was studied to determine which two energetic systems would be most beneficial in order to reduce the building's energy needs. The building in study has the particularity of having both the regular hotel use, as well as a Thalassotherapy treatment center with saltwater pools.

Beyond the system to be implemented (called classic system), a system with heat pumps was simulated in the TRNSYS software, as well as a trigeneration system, both associated with an auxiliary boiler for the production of hot water. The base data for the TRNSYS simulations were the thermal loads for heating and cooling, and the other necessary data was calculated. Thus, it was possible to model the three systems, associated with a solar thermal collectors unit for hot water production, and determine the respective consumption values.

A comparison of the total consumption of primary energy was performed, verifying that the trigeneration system was the most efficient (with a decrease of 31% when compared with the classic system). However, when analyzing the CO<sub>2</sub> emissions, the system that proved to be the best solution was the one with the heat pumps (with a decrease of 17% in relation to the classic).

Given the building's and the climate's singularity, resulting from the intensive energy use associated with the pools, an analysis of the building's consumption without the pools was performed. The predicted primary energy per useful area balance for this space was determined ( $IEE_{pr}$ ). Not having reference values, it was not possible to infer an energetic class associated with any of the energy solutions. However, it was possible to verify that both the solutions with the heat pumps and trigeneration had a significant decrease in the primary energy specific consumption, (61,5% and 52,6%) compared to the classic system, thus presenting higher energetic efficiencies.

Finally, the full building's analysis was performed, using RECS, and therefore, the data of the reference building. It was possible to verify that the building with the heat pumps energy system behaved as an nZEB, obtaining an energy classification A, with an energetic class ratio ( $R_{IEE}$ ) of 0,48. The other settings were close, obtaining the classification B ( $R_{IEE}$  of 0,70 for the classic system and 0,67 for the trigeneration).

In conclusion, the studied building can obtain the nZEB classification with the heat pump energy system.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor José Luís Alexandre, pela oportunidade de realizar esta dissertação, o apoio e disponibilidade prestados ao longo de todo o processo, e pela ajuda na compreensão do programa de simulação, e quando os resultados não eram os esperados. Sem este projeto não teria a oportunidade de fazer um trabalho de simulação tão interessante. Foi um orientador muito presente e prestável ao longo destes seis meses.

Agradeço, também, a todos os colaboradores da *Edigreen* pela disponibilidade e ajuda sempre que necessária, e pelo acompanhamento de perto deste projeto. Um especial agradecimento aos engenheiros José Barroso e Francisco Escobar pela disponibilidade sempre presente e auxílio em momentos críticos do trabalho.

Por último quero agradecer à minha família e amigos por estarem presentes, me oferecerem todo o apoio, e acreditarem em mim e no meu trabalho. Queria agradecer, em especial, à minha mãe, à Beatriz Mendes e à Ana Freitas pela ajuda oferecida na revisão da dissertação.

Clara Mancelos



*“Corner taken quickly,  
ORIGI!!”*

Steve Hunter



# Conteúdo

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Objetivos  | 2         |
| 1.2      | Estrutura da Dissertação   | 3         |
| <b>2</b> | <b>Revisão Bibliográfica</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1      | Panorama energético mundial  | 4         |
| 2.2      | Panorama energético europeu e português  | 8         |
| 2.3      | Caracterização do parque edificado Europeu e Português                         | 13        |
| 2.4      | NZEB e legislação  | 19        |
| 2.4.1    | Caracterização da família ZEB  | 19        |
| 2.4.2    | Legislação Europeia  | 24        |
| 2.4.3    | Legislação Portuguesa  | 28        |
| 2.5      | <i>Chillers</i>  | 30        |
| 2.5.1    | Princípio de funcionamento   | 30        |
| 2.5.2    | Absorção   | 31        |
| 2.6      | Bombas de Calor  | 33        |
| 2.6.1    | Princípio de funcionamento   | 33        |
| 2.6.2    | Caracterização   | 34        |
| 2.7      | Trigeração   | 35        |
| <b>3</b> | <b>Análise dos sistemas térmicos e do potencial climático</b>                  | <b>38</b> |
| 3.1      | Apresentação do Complexo Hoteleiro   | 38        |
| 3.1.1    | Dados climáticos de referência da localização do edifício                      | 40        |
| 3.1.2    | Apresentação do Edifício da Talassoterapia                                     | 44        |
| 3.1.3    | Envolvente preconizada inicialmente no projeto                                 | 46        |
| 3.1.4    | Vãos Envidraçados  | 49        |
| 3.1.5    | Inércia Térmica  | 50        |
| 3.1.6    | Condições de Projeto e Caracterização dos Espaços                              | 51        |
| 3.2      | Alteração da envolvente do edifício e análise dos consumos                     | 52        |
| 3.2.1    | Caracterização dos elementos construtivos da envolvente                        | 52        |
| 3.2.2    | Análise e comparação dos consumos energéticos                                  | 54        |
| <b>4</b> | <b>Elaboração e aplicação dos modelos de simulação dos diferentes sistemas</b> | <b>56</b> |
| 4.1      | Análise energética estática preliminar   | 56        |
| 4.1.1    | Necessidades Térmicas Sensíveis de Aquecimento e Arrefecimento                 | 58        |
| 4.1.2    | Consumos da Zona das Piscinas  | 60        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.1.3    | Consumo de AQS . . . . .   | 62         |
| 4.2      | Simulação no <i>software</i> TRNSYS para um sistema clássico (Caldeira+ <i>Chiller</i> ) . | 63         |
| 4.2.1    | Modelo de simulação da UTA das Piscinas . . . . .  | 65         |
| 4.2.2    | Modelo de simulação da climatização dos restantes espaços do edifício                      | 71         |
| 4.2.3    | Modelo de simulação da instalação de coletores solares térmicos . . . .                    | 77         |
| 4.2.4    | Modelo de simulação da produção de água quente para as piscinas e AQS                      | 79         |
| 4.3      | Modelo de simulação do sistema com Bombas de Calor . . . . .                               | 82         |
| 4.3.1    | Simulação da UTA das Piscinas . . . . .  | 82         |
| 4.3.2    | Modelo de simulação da climatização dos restantes espaços do edifício                      | 85         |
| 4.3.3    | Modelo de simulação da instalação de coletores solares térmicos . . . .                    | 91         |
| 4.3.4    | Modelo de simulação da produção de água quente para as piscinas e AQS                      | 91         |
| 4.4      | Simulação do sistema com Trigeração . . . . .  | 92         |
| 4.4.1    | Modelo de simulação da Unidade de Cogeração . . . . .                                      | 92         |
| 4.4.2    | Modelo de simulação da UTA das Piscinas . . . . .  | 94         |
| 4.4.3    | Modelo de simulação da climatização dos restantes espaços do edifício                      | 95         |
| 4.4.4    | Modelo de simulação da instalação de coletores solares térmicos . . . .                    | 96         |
| 4.4.5    | Modelo de simulação da produção de água quente para as piscinas e AQS                      | 96         |
| <b>5</b> | <b>Análise e Discussão dos resultados</b>  | <b>99</b>  |
| 5.1      | Resultados da Simulação do Sistema Clássico . . . . .                                      | 99         |
| 5.1.1    | Resultados obtidos na simulação no TRNSYS . . . . .  | 99         |
| 5.1.2    | Consumos associados ao sistema clássico . . . . .  | 106        |
| 5.2      | Resultados da Simulação do Sistema com Bombas de Calor . . . . .                           | 108        |
| 5.2.1    | Resultados obtidos no <i>software</i> TRNSYS . . . . .                                     | 108        |
| 5.2.2    | Consumos associados ao sistema das bombas de calor . . . . .                               | 113        |
| 5.3      | Resultados da Simulação do Sistema com Trigeração . . . . .                                | 114        |
| 5.3.1    | Resultados obtidos no <i>software</i> TRNSYS . . . . .                                     | 114        |
| 5.3.2    | Consumos associados ao sistema da trigeração . . . . .                                     | 120        |
| 5.4      | Comparação dos 3 sistemas energéticos . . . . .  | 121        |
| 5.5      | Cálculo para atingir o estatuto nZEB . . . . .   | 124        |
| 5.5.1    | Eficiência Energética sem a componente das Piscinas . . . . .                              | 124        |
| 5.5.2    | Eficiência Energética do edifício completo . . . . .                                       | 128        |
| <b>6</b> | <b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>  | <b>132</b> |
| 6.1      | Conclusões . . . . .   | 132        |
| 6.2      | Trabalhos Futuros . . . . .  | 134        |
|          | <b>Referências</b>   | <b>135</b> |
| <b>A</b> | <b>Cálculo detalhado da inércia térmica do edifício</b>                                    | <b>139</b> |
| A.1      | Determinação de $M_{si}$ e $r$ . . . . .   | 140        |
| A.1.1    | Elementos EL1 . . . . .  | 140        |
| A.1.2    | Elementos EL2 . . . . .  | 141        |
| A.1.3    | Elementos EL3 . . . . .  | 141        |
| A.2      | Determinação de $I_t$ . . . . .  | 141        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>B</b> | <b>Características técnicas dos equipamentos</b>                                  | <b>143</b> |
| B.1      | Coletores solares A200 . . . . .  | 143        |
| <b>C</b> | <b>Consumo horário de AQS e Taxa de ocupação do Hotel</b>                         | <b>144</b> |
| <b>D</b> | <b>Lista das rotinas utilizadas no <i>software</i> TRNSYS para cada simulação</b> | <b>146</b> |
| D.1      | Simulação do sistema clássico . . . . .   | 146        |
| D.2      | Simulação do sistema com bombas de calor . . . . .                                | 146        |
| D.3      | Simulação do sistema com trigeriação . . . . .                                    | 146        |
| <b>E</b> | <b>Distribuição anual dos consumos de cada equipamento após simulações</b>        | <b>150</b> |
| E.1      | Simulação do sistema clássico . . . . .   | 150        |
| E.2      | Simulação do sistema com bombas de calor . . . . .                                | 154        |
| E.3      | Simulação do sistema com trigeriação . . . . .                                    | 157        |



# Lista de Figuras

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Fontes de energia total em energia primária por tipos de energia em ktep [6]. . . . .   | 5  |
| 2.2  | Consumo total de energia primária por região em 2018 em Mtep [6]. . . . .   | 5  |
| 2.3  | Consumo de energia final por setor em ktep [6]. . . . .   | 6  |
| 2.4  | Distribuição percentual do consumo de energia final no mundo , por setor, em 2017 (Adaptado de [6]). . . . .                                    | 7  |
| 2.5  | Evolução das emissões de CO <sub>2</sub> em Mton [6]. . . . .   | 8  |
| 2.6  | Fornecimento de energia total em energia primária na UE, por tipos de energia, em ktep [6]. . . . .   | 9  |
| 2.7  | Fornecimento de energia total em energia primária em Portugal, por tipos de energia, em ktep [6]. . . . .                                       | 9  |
| 2.8  | Consumo de energia final na UE por setor em ktep [6]. . . . .   | 10 |
| 2.9  | Consumo de energia final em Portugal por setor em ktep [6]. . . . .   | 10 |
| 2.10 | Distribuição percentual do consumo de energia final por setor na UE em 2017 (Adaptado de [6]). . . . .  | 11 |
| 2.11 | Distribuição percentual do consumo de energia final por setor em Portugal em 2017 (Adaptado de [6]). . . . .                                    | 11 |
| 2.12 | Evolução das emissões de CO <sub>2</sub> na UE, em Mton [6]. . . . .  | 12 |
| 2.13 | Evolução das emissões de CO <sub>2</sub> em Portugal, em Mton[6]. . . . .   | 13 |
| 2.14 | Distribuição do espaço útil dos edifícios pelo território Europeu [8]. . . . .  | 14 |
| 2.15 | Distribuição percentual do espaço útil dos edifícios de serviço por uso na Europa (Adaptado de [8]). . . . .                                    | 15 |
| 2.16 | Categorização do parque edificado residencial na Europa pela data de construção [8]. . . . .  | 15 |
| 2.17 | Distribuição das emissões específicas de CO <sub>2</sub> dos edifícios por país da Europa em kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> [8]. . . . .     | 16 |
| 2.18 | Evolução do número de obras concluídas em Portugal entre 1995 e 2015 [9]. . . . .   | 17 |
| 2.19 | Distribuição percentual da área útil dos edifícios de serviço por uso em Portugal, em função da sua utilização (Adaptado de [9]). . . . .       | 18 |
| 2.20 | Distribuição da área útil dos edifícios de serviço por uso em Portugal por altura de construção em [m <sup>2</sup> ] (Adaptado de [9]). . . . . | 19 |
| 2.21 | Estrutura do sistema e elementos básicos de um NZEB [17] . . . . .  | 22 |
| 2.22 | Elementos a considerar para o projeto de um NZEB [16] . . . . .   | 24 |
| 2.23 | Representações dos níveis energéticos de acordo com os standards da norma EN150603 [22]. . . . .  | 26 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.24 | Esquema do conceito de um ciclo frigorífico de compressão de vapor. (Adaptado de [26]) . . . . .  | 31 |
| 2.25 | Esquema do ciclo básico de absorção. (Adaptado de [26]). . . . .  | 32 |
| 2.26 | Esquema de princípio do funcionamento de uma bomba de calor (Adaptado de <a href="http://www.portal-energia.com">www.portal-energia.com</a> ) . . . . .   | 33 |
| 2.27 | Esquema de princípio de um sistema de trigeriação típico. . . . .   | 36 |
| 2.28 | Variação do COP de um <i>chiller</i> de absorção em função da temperatura da água de arrefecimento à entrada (Modelo CH-K30, <i>Yazaki</i> ) . . . . .  | 37 |
| 3.1  | Imagem do complexo hoteleiro obtida por satélite . . . . .  | 39 |
| 3.2  | Fotografia aérea atual do complexo hoteleiro . . . . .  | 40 |
| 3.3  | Mapa da localização do edifício em Estudo - Ilha de Porto Santo . . . . .   | 41 |
| 3.4  | Gráfico da distribuição da dispersão das temperaturas anuais em [°C] para os dados climáticos do Funchal calculados através do <i>Climate Consultant</i> . . . . .  | 41 |
| 3.5  | Mapa de gradiente de temperatura da superfície do mar para o dia 10-01-2020 ( <a href="https://www.ipma.pt/pt/maritima/sst/index.jsp?area=madeira">https://www.ipma.pt/pt/maritima/sst/index.jsp?area=madeira</a> ) . . . . . | 42 |
| 3.6  | Mapa das zonas climáticas de inverno (esquerda) e verão (direita) . . . . .   | 43 |
| 3.7  | Exemplo dos efeitos da corrosão na central térmica do edifício da Talassoterapia (1/3) . . . . .  | 45 |
| 3.8  | Exemplo dos efeitos da corrosão na central térmica do edifício da Talassoterapia (2/3) . . . . .  | 45 |
| 3.9  | Exemplo dos efeitos da corrosão na central térmica do edifício da Talassoterapia (3/3) . . . . .  | 46 |
| 3.10 | Coletores Solares presentes no complexo hoteleiro . . . . .   | 51 |
| 4.1  | Imagem da modelação do edifício da Talassoterapia no <i>Sketchup</i> . (1/3) . . . . .  | 57 |
| 4.2  | Imagem da modelação do edifício da Talassoterapia no <i>Sketchup</i> . (2/3) . . . . .  | 58 |
| 4.3  | Imagem da modelação do edifício da Talassoterapia no <i>Sketchup</i> . (3/3) . . . . .  | 58 |
| 4.4  | Distribuição anual do consumo horário de aquecimento, por hora. . . . .   | 59 |
| 4.5  | Distribuição anual do consumo horário de arrefecimento, por hora. . . . .   | 59 |
| 4.6  | Distribuição das necessidades de arrefecimento sensível e latente da piscina, por hora. . . . .   | 60 |
| 4.7  | Distribuição das perdas de calor por evaporação anuais em cada piscina, por hora. . . . .   | 61 |
| 4.8  | Distribuição das necessidades de aquecimento da água das piscinas, por hora. . . . .  | 62 |
| 4.9  | Montagem da simulação do sistema clássico na interface do <i>Simulation Studio</i> . . . . .  | 64 |
| 4.10 | Exemplo de um gráfico de resultado de simulação no TRNSYS (Caudal de ar que passa na UTA das piscinas) . . . . .  | 65 |
| 4.11 | Esquema do conceito da UTA das piscinas, e dos sistemas da sua alimentação. . . . .   | 66 |
| 4.12 | Esquema das duas condições-tipo de entrada, e processos termodinâmicos realizados pela UTA das piscinas num diagrama psicrométrico. . . . .   | 68 |
| 4.13 | Esquema de princípio do sistema de tratamento de ar dos espaços do edifício. . . . .  | 72 |
| 4.14 | Fluxograma dos controladores das bombas do sistema de tratamento de ar dos espaços do edifício. . . . .   | 73 |
| 4.15 | Esquema do conceito do aquecimento dos espaços do edifício. . . . .   | 75 |
| 4.16 | Fluxograma dos controladores das bombas do sistema de aquecimento dos espaços do edifício. . . . .  | 76 |



|   |     |
|---|-----|
| 4.17 Fluxograma dos controladores das bombas do sistema de arrefecimento dos espaços do edifício. . . . .   | 77  |
| 4.18 Esquema do conceito do sistema de aquecimento de água por via de painéis solares térmicos. . . . .   | 78  |
| 4.19 Esquema do conceito do sistema montagem para o consumo de AQS e das piscinas. . . . .  | 80  |
| 4.20 Fluxograma dos controladores das bombas do sistema de produção de AQS e piscinas. . . . .  | 81  |
| 4.21 Representação esquemática de um sistema de climatização que utiliza uma UTA alimentada por uma bomba de calor e uma caldeira. . . . .                  | 83  |
| 4.22 Esquema do conceito da UTA das piscinas para a simulação das bombas de calor. . . . .  | 84  |
| 4.23 Esquema do conceito do aquecimento e tratamento do ar dos espaços para a simulação das bombas de calor. . . . .  | 87  |
| 4.24 Fluxograma dos controladores das válvulas de duas vias no sistema de climatização dos espaços (Vias referentes à Figura 4.23). . . . .                 | 88  |
| 4.25 Esquema do conceito do arrefecimento e tratamento do ar dos espaços para a simulação das bombas de calor. . . . .                                      | 90  |
| 4.26 Esquema do conceito do sistema de cogeração da simulação para a trigerção. . . . .   | 93  |
| 4.27 Esquema do conceito para a UTA das piscinas para a simulação da trigerção. . . . .   | 94  |
| 4.28 Representação esquemática do conceito da climatização dos espaços do edifício. . . . .   | 95  |
| 4.29 Representação esquemática do conceito do tratamento do ar dos espaços para a simulação da trigerção. . . . .   | 96  |
| 4.30 Esquema do conceito do sistema montagem para o consumo de AQS e das piscinas para a simulação da trigerção. . . . .                                    | 97  |
| 5.1 Gráfico das temperaturas envolvidas na UTA da simulação do sistema clássico, em [°C]. . . . .   | 100 |
| 5.2 Gráfico das temperaturas associadas à caldeira da simulação do sistema clássico, em [°C]. . . . .   | 101 |
| 5.3 Gráfico das humidades absolutas envolvidas na UTA da simulação do sistema clássico, em [kg/kg <sub>ar seco</sub> ]. . . . .                             | 102 |
| 5.4 Gráfico das temperaturas da climatização dos espaços da simulação do sistema clássico, em [°C]. . . . .   | 103 |
| 5.5 Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente pelo sistema solar térmico (1/2), em [°C]. . . . .                                       | 104 |
| 5.6 Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente pelo sistema solar térmico (2/2), em [°C]. . . . .                                       | 104 |
| 5.7 Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema clássico (1/2), em [°C]. . . . . | 105 |
| 5.8 Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema clássico (2/2), em [°C]. . . . . | 106 |
| 5.9 Distribuição do consumo anual de energia final por equipamento para a simulação do sistema clássico, em (%). . . . .                                    | 107 |
| 5.10 Gráfico das temperaturas envolvidas na UTA da simulação do sistema com bombas de calor, em [°C]. . . . .   | 109 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.11 | Gráfico das humidades absolutas envolvidas na UTA da simulação do sistema com bombas de calor, em [kg/kg <sub>ar seco</sub> ]. . . . .                     | 110 |
| 5.12 | Gráfico das temperaturas da climatização dos espaços da simulação do sistema com bombas de calor. . . . .  | 111 |
| 5.13 | Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema com bombas de calor (1/2), em [°C]. | 112 |
| 5.14 | Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema com bombas de calor (2/2), em [°C]. | 112 |
| 5.15 | Distribuição em do consumo anual de energia final por equipamento para a simulação das bombas de calor (em %). . . . .                                     | 113 |
| 5.16 | Gráfico das temperaturas à saída da unidade de cogeração na simulação com trigerção (1/2), em [°C]. . . . .  | 115 |
| 5.17 | Gráfico das temperaturas à saída da unidade de cogeração na simulação com trigerção (2/2), em [°C]. . . . .  | 115 |
| 5.18 | Gráfico das temperaturas envolvidas na UTA da simulação do sistema com trigerção, em [°C] . . . . .  | 116 |
| 5.19 | Gráfico das humidades absolutas envolvidas na UTA da simulação do sistema com trigerção, em [kg/kg <sub>ar seco</sub> ]. . . . .                           | 117 |
| 5.20 | Gráfico das temperaturas da climatização dos espaços da simulação do sistema com trigerção. . . . .  | 118 |
| 5.21 | Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema com trigerção (1/2). . . . .        | 119 |
| 5.22 | Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema com trigerção (2/2). . . . .        | 119 |
| 5.23 | Distribuição do consumo anual de energia final por equipamento para a simulação da trigerção, em (%). . . . .  | 121 |
| 5.24 | Consumo total de energia primária para três simulações: sistema clássico, bombas de calor e trigerção, em [kWh <sub>EP</sub> /ano] . . . . .               | 122 |
| 5.25 | Comparação das emissões de CO <sub>2</sub> equivalente para os 3 simulações em [tonCO <sub>2</sub> /ano]   | 123 |
| 5.26 | Distribuição percentual do uso de energia anual da configuração do edifício sem piscinas . . . . .   | 124 |
| 5.27 | IEE <sub>pr</sub> para a configuração sem piscinas em kWh <sub>EP</sub> /m <sup>2</sup> .ano . . . . .   | 127 |
| C.1  | Distribuição percentual diária da taxa de ocupação anual do hotel. . . . .   | 145 |
| E.1  | Consumo anual da caldeira para a simulação do sistema clássico em [kW]. . . .  | 151 |
| E.2  | Consumo anual da <i>chiller</i> para a simulação do sistema clássico em [kW]. . . .  | 151 |
| E.3  | Consumo anual das bombas de circulação para a simulação do sistema clássico em [kW]. . . . .   | 152 |
| E.4  | Consumo anual da ventilação para a simulação do sistema clássico em [kW]. .  | 152 |
| E.5  | Consumo anual da iluminação e dos equipamentos elétricos para a simulação do sistema clássico em [kW]. . . . .   | 153 |
| E.6  | Consumo diário das bombas do sistema lúdico [kW]. . . . .  | 154 |
| E.7  | Consumo anual da caldeira para a simulação do sistema com bombas de calor em [kW]. . . . .   | 155 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| E.8  | Consumo anual da bomba de calor ar-ar para a simulação com bombas de calor em [kW]. . . . .             | 155 |
| E.9  | Consumo anual da bomba de calor água-água para a simulação com bombas de calor em [kW]. . . . .         | 156 |
| E.10 | Consumo anual das bombas de circulação para a simulação do sistema com bombas de calor em [kW]. . . . . | 156 |
| E.11 | Consumo anual do MCI na simulação com trigeração em [kW]. . . . .                                       | 157 |
| E.12 | Consumo anual do <i>chiller</i> de absorção na simulação com trigeração em [kW]. .                      | 158 |
| E.13 | Consumo anual da caldeira na simulação com trigeração em [kW]. . . . .                                  | 158 |
| E.14 | Consumo anual das bombas de circulação na simulação com trigeração em [kW].                             | 159 |



# Lista de Tabelas

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Classes de eficiência energética para os valores de $R_{IEE}$ [25]   | 30 |
| 3.1  | Critérios para a determinação da zona climática de inverno [33]  | 43 |
| 3.2  | Critérios para a determinação da zona climática de verão [33]  | 43 |
| 3.3  | Dados climáticos medidos para a localização do edifício e zonas climáticas   | 44 |
| 3.4  | Constituição inicial dos materiais da Parede Exterior do edifício da Talassoterapia                                | 47 |
| 3.5  | Constituição inicial dos materiais do Piso Exterior do edifício da Talassoterapia                                  | 47 |
| 3.6  | Constituição inicial dos materiais da Cobertura Exterior 1 do edifício da Talassoterapia                           | 48 |
| 3.7  | Constituição inicial dos materiais da Cobertura Exterior 2 do edifício da Talassoterapia                           | 48 |
| 3.8  | Constituição inicial dos materiais do Pavimento Interior do edifício da Talassoterapia                             | 49 |
| 3.9  | Constituição inicial dos materiais do Teto Interior do edifício da Talassoterapia                                  | 49 |
| 3.10 | Constituição inicial dos materiais da Parede Interior do edifício da Talassoterapia                                | 49 |
| 3.11 | Composição dos vidros fixos utilizados   | 49 |
| 3.12 | Composição dos vidros móveis utilizados  | 50 |
| 3.13 | Classes de inércia térmica interior, $I_t$ [34]  | 51 |
| 3.14 | Constituição de acordo com a <i>PassivHaus</i> dos materiais da Parede Exterior do edifício da Talassoterapia      | 52 |
| 3.15 | Constituição de acordo com a <i>PassivHaus</i> dos materiais do Piso Exterior do edifício da Talassoterapia        | 53 |
| 3.16 | Constituição de acordo com a <i>PassivHaus</i> dos materiais da Cobertura Exterior 1 do edifício da Talassoterapia | 53 |
| 3.17 | Constituição de acordo com a <i>PassivHaus</i> dos materiais da Cobertura Exterior 2 do edifício da Talassoterapia | 53 |
| 3.18 | Consumos energéticos após a simulação no <i>EnergyPlus</i>   | 54 |
| 3.19 | Utilização energética final [MWh] após simulação no <i>EnergyPlus</i>  | 54 |
| 4.1  | Variáveis de controlo necessárias à modelização da UTA   | 69 |
| 4.2  | Características do <i>chiller</i> utilizado na simulação clássica  | 69 |
| 4.3  | Características da caldeira utilizada na simulação clássica  | 70 |
| 4.4  | Características das bombas de circulação de frio utilizadas na UTA na simulação clássica                           | 70 |
| 4.5  | Características das bombas de circulação de recuperação utilizadas na UTA na simulação clássica                    | 70 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.6  | Características das bombas de circulação da caldeira utilizadas na UTA na simulação clássica . . . . .   | 71 |
| 4.7  | Condições neutras de temperatura e humidade para a insuflação do tratamento do ar . . . . .  | 72 |
| 4.8  | Características das bombas de circulação da água fria utilizadas no tratamento de ar do modelo do sistema clássico . . . . .                                       | 73 |
| 4.9  | Características das bombas de circulação da água quente utilizadas no tratamento de ar do modelo do sistema clássico . . . . .                                     | 74 |
| 4.10 | Condições de <i>setpoint</i> para o aquecimento dos espaços . . . . .  | 74 |
| 4.11 | Condições de <i>setpoint</i> para o arrefecimento dos espaços . . . . .  | 75 |
| 4.12 | Características das bombas de circulação utilizadas no aquecimento dos espaços do modelo do sistema clássico . . . . .   | 76 |
| 4.13 | Características das bombas de circulação do <i>chiller</i> utilizadas no arrefecimento dos espaços do modelo do sistema clássico . . . . .                         | 77 |
| 4.14 | Características da água fria de consumo para funcionamento dos coletores solares   | 78 |
| 4.15 | Características do controlador ON/OFF com histerese utilizado na instalação de produção AQS por solar térmico . . . . .  | 79 |
| 4.16 | Características da bomba de circulação da componente da produção de solar térmico . . . . .  | 79 |
| 4.17 | Gama de temperaturas dos controladores ON/OFF que controlam as válvulas de mistura das piscinas e AQS . . . . .  | 81 |
| 4.18 | Características das bombas envolvidas no circuito da produção de água quente para as piscinas e AQS . . . . .  | 82 |
| 4.19 | Características da Bomba de Calor Ar-Ar para a UTA das Piscinas . . . . .  | 84 |
| 4.20 | Características das Bombas de circulação usadas no circuito da UTA das Piscinas  | 85 |
| 4.21 | Características das Bombas de circulação usadas no circuito da UTA das Piscinas  | 85 |
| 4.22 | Temperaturas de <i>Setpoint</i> das Baterias usadas para a instalação de aquecimento e tratamento do ar dos espaços para a simulação com bombas de calor . . . . . | 88 |
| 4.23 | Características das bombas de circulação no circuito de aquecimento dos espaços para a simulação com bombas de calor . . . . .                                     | 89 |
| 4.24 | Características das bombas de circulação no circuito de tratamento do ar no aquecimento dos espaços para a simulação com bombas de calor . . . . .                 | 89 |
| 4.25 | Características das bombas de circulação no circuito de arrefecimento dos espaços para a simulação com bombas de calor . . . . .                                   | 91 |
| 4.26 | Características das bombas de circulação no circuito de tratamento do ar no arrefecimento dos espaços para a simulação com bombas de calor . . . . .               | 91 |
| 4.27 | Características da Caldeira utilizada para a produção de água quente para AQS e Piscinas . . . . .   | 92 |
| 4.28 | Características do MCI utilizado na unidade de cogeração na simulação com trigeriação . . . . .  | 93 |
| 4.29 | Características de <i>output</i> do controlador da caldeira do circuito das piscinas para a produção de água quente para AQS e Piscinas . . . . .                  | 97 |
| 4.30 | Características de <i>output</i> do controlador da caldeira do circuito do AQS para a produção de água quente para AQS e Piscinas . . . . .                        | 98 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.1  | Uso de energia final por equipamento para a simulação do sistema clássico em MWh/ano. . . . .                          | 108 |
| 5.2  | Uso de energia anual de energia final por equipamento para a simulação do sistema clássico em kWh/ano. . . . .         | 114 |
| 5.3  | Balanço das potências disponíveis pelo MCI e das necessidades do edifício em [MWh/ano] . . . . .                       | 120 |
| 5.4  | Fatores de conversão de energia primária para emissões de CO <sub>2</sub> (Adaptado de [41]) . . . . .                 | 123 |
| 5.5  | Uso de energia anual de energia final por tipo de uso para a configuração do edifício sem piscinas em kWh/ano. . . . . | 125 |
| 5.6  | Uso total de energia por tipo de uso para o edifício de referência em [kWh/ano]  | 128 |
| 5.7  | Uso total de energia por tipo de uso para o edifício com o sistema clássico em [kWh/ano] . . . . .                     | 129 |
| 5.8  | Uso total de energia por tipo de uso para o edifício com com bombas de calor em [kWh/ano] . . . . .                    | 130 |
| 5.9  | Uso total de energia por tipo de uso para o edifício com trigeração em [kWh/ano]                                       | 130 |
| 5.10 | Aplicação da Portaria nº42/2019 aos três sistemas energéticos simulados . . . .  | 131 |
| 5.11 | Aplicação da Portaria nº42/2019 aos três sistemas energéticos simulados com recuperação de calor hipotética . . . . .  | 131 |
| A.1  | Cálculo das massas superficiais dos elementos construtivos . . . . .   | 139 |
| A.2  | Cálculo dos valores de $m_i$ , $M_{si}$ , $r$ para os elementos EL1 . . . . .  | 140 |
| A.3  | Cálculo dos valores de $m_i$ , $M_{si}$ , $r$ para os elementos EL2 . . . . .  | 141 |
| A.4  | Cálculo dos valores de $m_i$ , $M_{si}$ , $r$ para os elementos EL3 . . . . .  | 141 |
| A.5  | Cálculo da inércia térmica $I_t$ . . . . .   | 142 |
| B.1  | Características técnicas dos coletores solares térmicos A200 . . . . .   | 143 |
| C.1  | Consumo horário de AQS normalizado para a Talassoterapia . . . . .   | 144 |
| D.1  | Lista de componentes <i>Proforma</i> utilizados para a simulação do sistema clássico                                   | 147 |
| D.2  | Lista de componentes <i>Proforma</i> utilizados para a simulação do sistema com bombas de calor . . . . .              | 148 |
| D.3  | Lista de componentes <i>Proforma</i> utilizados para a simulação do sistema com bombas de calor . . . . .              | 149 |

# Abreviaturas

|        |   |
|--------|---|
| AQS    | Água Quente Sanitária   |
| ASHRAE | American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers |
| AVAC   | Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado                                  |
| BES    | Building Energy System  |
| BREEAM | Building Research Establishment Environmental Assessment Method           |
| BPIE   | Buildings Performance Institute of Europe                                 |
| CCHP   | Combined Cooling Heating and Power  |
| CHP    | Combined Heating and Power  |
| COP    | Coefficient of Performance  |
| DGEG   | Direção Geral de Energia e Geologia                                       |
| EER    | Energy Efficiency Ratio   |
| EPBD   | Energy Performance of Buildings Directive                                 |
| EM     | Estados Membros   |
| GD     | Graus-Dia   |
| GES    | Grande Edifício de Serviços   |
| HX     | Permutador de Calor (Heat Exchanger)                                      |
| IEA    | International Energy Agency   |
| LCA    | Life Cycle Assessment   |
| LC-ZEB | Life Cycle Zero Energy Building   |
| LEED   | Leadership in Energy and Environmental Design                             |
| LNEC   | Laboratório Nacional de Engenharia Civil                                  |
| MCI    | Motor de Combustão Interna  |
| NZEB   | Net Zero Energy Building  |
| nZEB   | near Zero Energy Building   |
| PCI    | Poder Calorífico Inferior   |
| PEF    | Polietileno   |
| PH     | PassivHaus  |
| PHPP   | Passive House Planning Package  |
| PV     | Fotovoltaico  |
| RECS   | Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços |



|       |  |
|-------|--|
| REHVA | Federation of European Heating Ventilation and Air Conditioning Associations |
| SCE   | Sistema Nacional de Certificação Energética dos Edifícios                    |
| tep   | Toneladas Equivalentes de Petróleo   |
| UE    | União Europeia   |
| UTA   | Unidade de Tratamento de Ar  |
| XPS   | Polistireno extrudido  |
| ZEB   | Zero Energy Building   |

# Variáveis e Símbolos

|                  |  |  |
|------------------|--|--|
| $A_p$            | Área útil de pavimento   | [m <sup>2</sup> ]                        |
| $c_p$            | Calor específico a pressão constante   | [J/(kgK)]                                |
| $[E_{S,i}]$      | Energia produzida pelo equipamento ( <i>i</i> ) do tipo S                        | [kWh/ano]                                |
| $[E_{REN,i}]$    | Energia produzida pela fonte renovável ( <i>i</i> )                              | [kWh/ano]                                |
| $[E_{T,i}]$      | Energia produzida pelo equipamento ( <i>i</i> ) do tipo T                        | [kWh/ano]                                |
| $F_{pu,i}$       | Fator de conversão de energia final para primária, por fonte de energia <i>i</i> | [kWh <sub>EP</sub> /kWh]                 |
| $g_{\perp}$      | Fator Solar Global   | [-]                                      |
| $k$              | Coefficiente de condução térmica   | [W/mK]                                   |
| $IEE_{pr,REN}$   | Indicador de eficiência energética previsto renovável                            | [kWh <sub>EP</sub> /m <sup>2</sup> .ano] |
| $IEE_{pr,S}$     | Indicador de eficiência energética previsto de consumos de tipo S                | [kWh <sub>EP</sub> /m <sup>2</sup> .ano] |
| $IEE_{pr,T}$     | Indicador de eficiência energética previsto de consumos de tipo T                | [kWh <sub>EP</sub> /m <sup>2</sup> .ano] |
| $IEE_{ref,S}$    | Indicador de eficiência energética de referência de consumos de tipo S           | [kWh <sub>EP</sub> /m <sup>2</sup> .ano] |
| $IEE_{ref,T}$    | Indicador de eficiência energética de referência de consumos de tipo T           | [kWh <sub>EP</sub> /m <sup>2</sup> .ano] |
| $\dot{m}_{aq}$   | Caudal de ar necessário para o aquecimento                                       | [kg/h]                                   |
| $\dot{m}_{arr}$  | Caudal de ar necessário para o arrefecimento                                     | [kg/h]                                   |
| $\dot{m}_{real}$ | Caudal mássico de ar real  | [kg/s]                                   |
| $Q_L$            | Necessidades térmicas latentes   | [W]                                      |
| $Q_{real}$       | Necessidades térmicas latentes adaptada ao caudal de ar real                     | [W]                                      |
| $R_{IEE}$        | Rácio da classe energética   | [-]                                      |
| $R_{th}$         | Resistência térmica  | [m <sup>2</sup> °C/W]                    |
| $\dot{V}$        | Caudal volúmico  | [l/s]                                    |
| $\dot{V}_{real}$ | Caudal volúmico real calculado   | [l/s]                                    |
| $T_{exterior}$   | Temperatura exterior   | [°C]                                     |
| $T_{insuflação}$ | Temperatura de insuflação  | [°C]                                     |
| $U$              | Coefficiente global de transferência de calor                                    | [W/m <sup>2</sup> °C]                    |
| $w_{exterior}$   | Humidade absoluta de insuflação  | [kg/kg <sub>ar seco</sub> ]              |
| $w_{insuflação}$ | Humidade absoluta de insuflação  | [kg/kg <sub>ar seco</sub> ]              |
| $w_{setpoint}$   | Humidade absoluta de <i>setpoint</i>   | [kg/kg <sub>ar seco</sub> ]              |
| $\eta$           | Rendimento Térmico   | [-]                                      |
| $\Theta_{ext,i}$ | Temperatura de inverno exterior  | [°C]                                     |
| $\Theta_{ext,v}$ | Temperatura de verão exterior  | [°C]                                     |
| $\rho$           | Massa volúmica   | [kg/m <sup>3</sup> ]                     |
| $\Delta w$       | Diferença entre a humidade absoluta exterior e a de insuflação                   | [kg/kg <sub>ar seco</sub> ]              |

# Capítulo 1

## Introdução

Atualmente, o setor dos edifícios é o terceiro maior consumidor mais energia no mundo, sendo uma enorme fonte de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Na Europa, entre 30 e 40% do total da energia primária utilizada, e 44% dos materiais utilizados estão associados ao setor dos edifícios, sendo uma percentagem muito significativa na carga ambiental total das atividades humanas [1, 2]. Assim, a avaliação do impacto deste setor, bem como a melhoria da sua eficiência, constitui uma enorme prioridade para cumprir com os requisitos de sustentabilidade impostos pelos acordos de Paris e pela União Europeia.

A recuperação eficaz de edifícios existentes para que possam atingir ou aproximar-se do estatuto de *near Zero Energy Building* (nZEB), revela-se muito importante pois permite introduzir melhorias na eficiência energética e assim promover claros benefícios ambientais, económicos e sociais [3].

Existem vários níveis de ambição no caminho para os *zero energy buildings* (ZEB), dependendo da zona climática onde se encontram [2]. Os edifícios em climas mais frios usam mais energia para aquecer do que os edifícios em climas mais quentes, de uma forma geral utilizam-na para aquecer e para ventilar. Uma forma de reduzir as necessidades de aquecimento passa pela melhoria da envolvente térmica do edifício, (por exemplo: aumentar o isolamento térmico, recuperação de calor para diminuir o consumo da ventilação) tendo maior influência nas zonas climáticas dominadas por necessidades de aquecimento. Assim, é mais fácil construir um nZEB neste tipo de clima do que nos climas mais quentes [3].

Melhorar a eficiência energética dos edifícios novos não é uma medida com impacto suficiente na transição energética dos edifícios, pois o parque imobiliário português e europeu é antigo, sendo, também, necessárias medidas para os edifícios sujeitos a intervenções. As estratégias de reclassificação de edifícios com o objetivo de obtenção de melhor eficiência energética para atingir o estatuto de nZEB podem ser divididas em 3 categorias diferentes [3]:

- Ações em relação à envolvente e aspetos do *design* como aumento do isolamento, redução das infiltrações, melhoria na qualidade das portas e janelas, exploração de ganhos solares;
- Ações relativas aos sistemas energéticos, como a instalação de sistemas de AVAC muito eficientes, sistemas de iluminação elétricos, melhorias dos eletrodomésticos, instalação de energia proveniente de fontes renováveis;
- Ações associadas aos serviços de gestão, monitorização e controlo das operações do edifício, utilizando sensores [4].

A aplicação destas estratégias resulta num edifício energeticamente mais eficiente, com baixas emissões de gases com efeitos de estufa, sendo, ao mesmo tempo, mais confortável e rentável para o ocupante [3].

A problemática é solucionar o problema energético do complexo hoteleiro em estudo para o tornar num edifício nZEB, segundo as regulamentações, tendo em conta as limitações ambientais e geográficas da ilha de Porto Santo. Por se localizar numa ilha, os recursos de água doce são escassos e a água salgada é predominante, condição que afeta severamente as tubagens e os equipamentos de serviços a médio-longo prazo, pelo que é necessário ter um cuidado extra com esta componente.

Para otimizar o sistema energético a usar no edifício em questão foi necessário realizar uma simulação dinâmica, com recurso ao *software* de simulação TRNSYS. Este *software* permite a simulação detalhada dos sistemas energéticos, de forma a aproximar o modelo real, e prever o comportamento energético do edifício.

## 1.1 Objetivos

Os objetivos desta dissertação são os seguintes:

- Determinar a melhor envolvente térmica para o edifício em Porto Santo;
- Estudar os sistemas primários de climatização a nível físico e termodinâmico para aplicar a um complexo hoteleiro com piscinas;
- Simular os sistemas primários de climatização dinamicamente no TRNSYS;
- Transformar o projeto a decorrer num projeto para um edifício nZEB;
- Averiguar qual o sistema primário de climatização mais vantajoso para a situação em causa;

- Determinar qual o sistema primário de climatização que consome menos energia primária;
- Determinar qual o sistema primário de climatização com menos emissões de CO<sub>2</sub>;
- Aferir se algum dos sistemas primários de climatização é um nZEB, de acordo com a legislação.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

Para além da introdução, esta dissertação contém mais cinco capítulos. No capítulo 2, é apresentado o panorama atual a nível energético, assim como no contexto dos edifícios. É descrita a legislação europeia e portuguesa relativa à eficiência energética, sendo também descritos os sistemas energéticos que serão utilizados ao longo do projeto. No capítulo 3, é apresentado o panorama em que se insere o complexo hoteleiro, assim como as suas características. No capítulo 4 é explicada a aplicação da simulação de cada sistema energético no TRNSYS de forma detalhada. No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com as simulações do TRNSYS, assim como as comparações em termos de consumos energéticos, e é feita a análise de eficiência energética. No capítulo 6 destacam-se as conclusões obtidas e faz-se uma análise crítica dos potenciais trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Neste capítulo analisa-se o panorama energético mundial, particularizando-se depois com a energia e os edifícios na Europa. Neste contexto, é feito um estudo sobre o estado geral, com uma incidência particular sobre o estado do parque edificado tanto europeu como português, analisando as suas características e possíveis melhorias, com foco nos edifícios de serviços. De seguida, abordam-se várias definições de *Net Zero Energy Buildings* (NZEBS), *near Zero Energy Buildings* (nZEBS) e *Zero Energy Buildings* (ZEBs), de acordo com a literatura, assim como uma revisão da legislação portuguesa e europeia sobre este tipo de edifícios. Finalmente, são analisadas várias soluções para os sistemas energéticos, de acordo com a literatura, aplicadas a edifícios da família ZEB, e a sua possível implementação de acordo com as legislações.

### 2.1 Panorama energético mundial

Num mundo em crescimento contínuo, o uso de energia tem aumentado, e por isso também as preocupações - quer associadas às limitações das suas fontes quer ao impacto ambiental associado [5]. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), foi possível determinar que, entre 1984 e 2004, o consumo de energia primária aumentou 49% e as emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram 43% [5]. Tais aumentos parecem acentuar-se já que, e segundo dados recentes da IEA, entre 1990 e 2017, verificou-se um aumento do fornecimento de energia primária de 86,8% no gás natural, 70% no carvão e 37,6% no petróleo, sendo estas as fontes de energia que registam maior aumento (Figura 2.1).

Atualmente já há uma clara consciência do impacto adverso que as emissões dos combustíveis fósseis implicam, o que resulta na conseqüente diminuição do seu uso, a par de uma maior aposta na eficiência energética e na evolução de soluções de energia "limpa" e renovável. Contudo, as energias fósseis acabam por ser, ainda, as mais acessíveis em termos económicos, o

## Avaliação de Soluções de Climatização aplicadas na Hotelaria para atingir a classificação nZEB

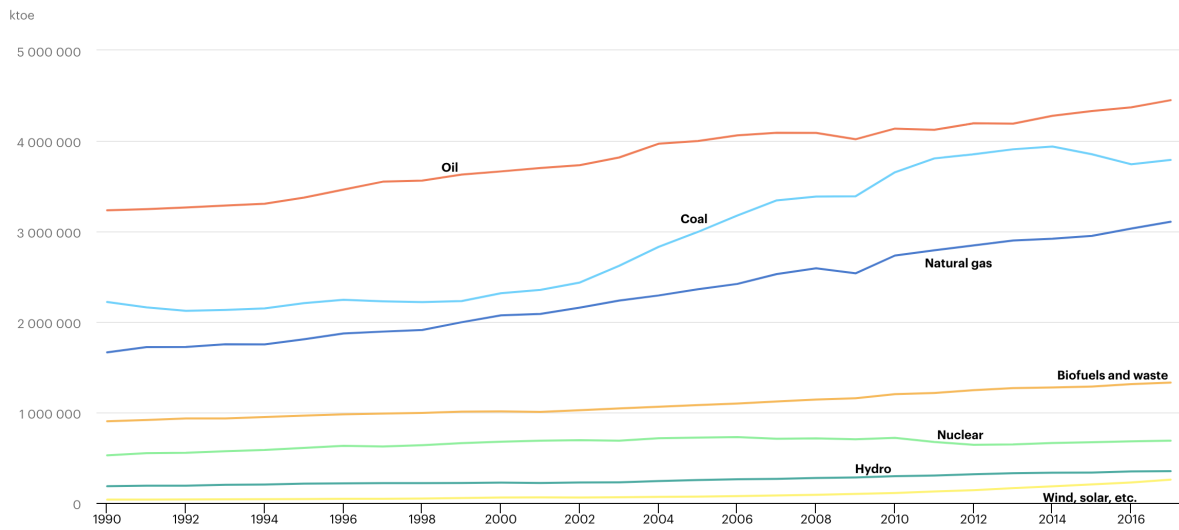


Figura 2.1: Fontes de energia total em energia primária por tipos de energia em ktep [6].

que torna pouco apelativo o desenvolvimento de outro tipo de fontes energéticas mais sustentáveis. Neste sentido, países com uma economia em rápida emergência e necessidade de grandes infraestruturas energéticas, como a China, por exemplo, aproveitam este estado económico. A Figura 2.2 ilustra o *mix* energético em energia primária para algumas potências mundiais.

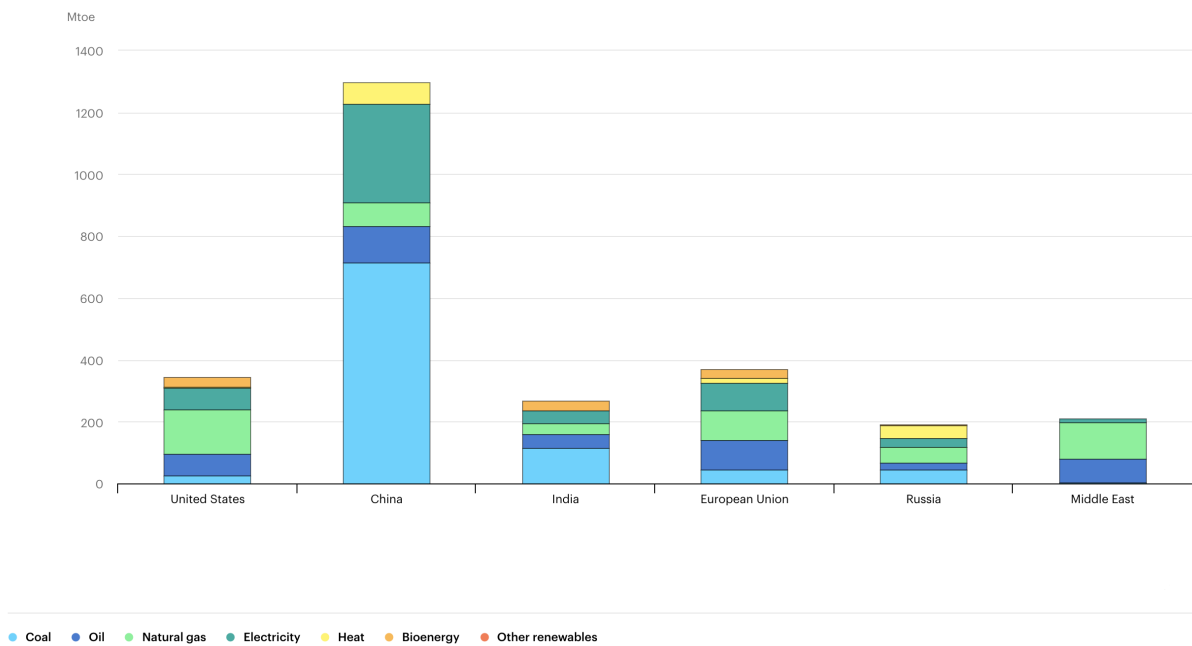


Figura 2.2: Consumo total de energia primária por região em 2018 em Mtep [6].

Como é possível observar, verifica-se que a China consome energia numa ordem de grandeza 4 vezes superior à União Europeia, sendo que metade é carvão, uma energia fóssil considerada "suja", contudo muito barata.

Quando considerados os consumos de energia final, verifica-se, também, que estes aumentaram durante este intervalo de tempo [6], tal como indicado na Figura 2.3 que destaca a evolução dos consumos de energia final para os diferentes setores em kilotoneladas equivalentes de petróleo (ktep) [6]. Os setores mais consumidores, e também os que tiveram os maiores aumentos são a indústria e o transporte. No caso do residencial, verifica-se um aumento de 34% sendo o terceiro mais consumidor em 2017, com mais de  $2 \cdot 10^6$  ktep.

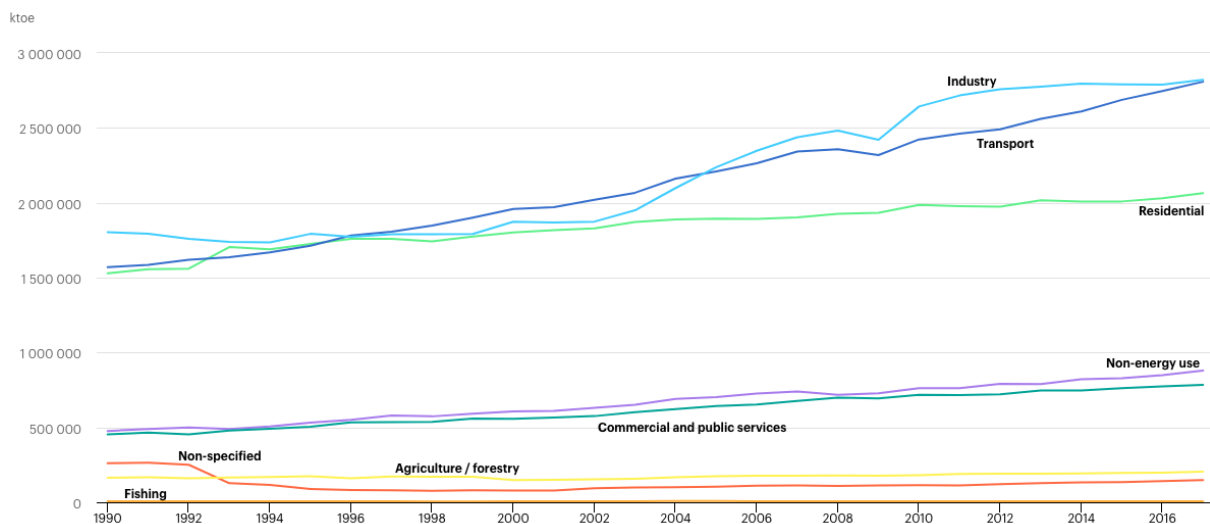


Figura 2.3: Consumo de energia final por setor em ktep [6].

O aumento populacional, o aumento de serviços e dos níveis de conforto, juntamente com o aumento de tempo passado no interior dos edifícios contribuem para explicar o aumento do consumo energético dos edifícios [5]. Em 1990, o consumo em energia final de eletricidade era 10 901 TWh e em 2017 passou a ser 23 696 TWh, registando-se um aumento de cerca de 117 % em apenas 27 anos [6].

A Figura 2.4 ilustra a distribuição do consumo de energia final, em percentagem, no ano de 2017.



Distribuição Percentual do Consumo de Energia Final por Setor no Mundo em 2017

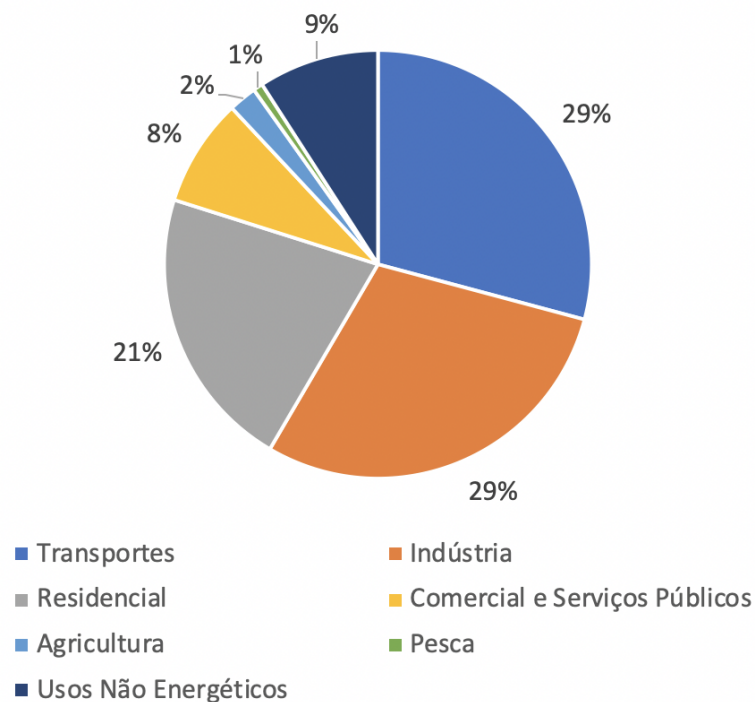


Figura 2.4: Distribuição percentual do consumo de energia final no mundo , por setor, em 2017 (Adaptado de [6]).

É possível verificar, assim, que o setor residencial é o terceiro mais consumidor de energia, pelo que melhorias energéticas neste setor teriam grande impacto no consumo global de energia.

As crescentes preocupações ambientais e o declarado estado recente de emergência climática têm contribuído para o aparecimento de novas soluções de energia renovável, cada vez mais eficientes na transformação de energia, o que se refletiria, idealmente, na redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

Contudo, verifica-se que, durante o período de tempo representado, as emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram 60%. Tal valor, muito significativo, conduz à necessidade de aplicação de medidas urgentes que possibilitem uma real diminuição de consumos, passando necessariamente por um processo de transição energética. Sendo o setor residencial o terceiro setor que mais energia consome, os edifícios assumem um papel importante nesta transição, e consequente redução das emissões de CO<sub>2</sub>. A Figura 2.5 ilustra as emissões totais de CO<sub>2</sub> em megatoneladas (Mton) entre 1990 e 2017 [6].

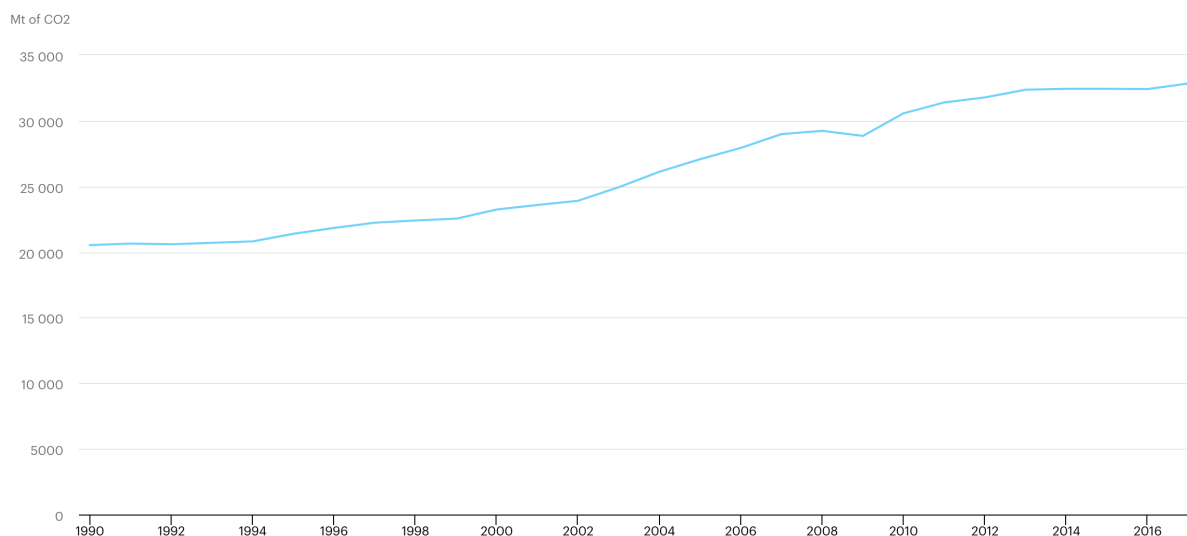


Figura 2.5: Evolução das emissões de CO<sub>2</sub> em Mton [6].

## 2.2 Panorama energético europeu e português

Tal como na secção anterior, apresenta-se, aqui, o fornecimento de energia total em energia primária por tipos de energia para o período entre 1990 e 2017, calculados para a União Europeia (UE) e para Portugal (Figuras 2.6 e 2.7, respetivamente). É possível observar uma grande diferença entre a distribuição global da UE e de Portugal, sendo que durante o período de tempo representado, o fornecimento de energia era dominado pelo petróleo. Verifica-se, contudo, que ocorreu uma diminuição significativa de 19% desde 1990 e de 45% desde 2002. No panorama europeu, é de destacar a diminuição do consumo do petróleo na ordem de 12% e do carvão em cerca de 48%, o que é muito significativo. Relativamente às energias renováveis, na UE nota-se um crescimento substancial do uso de biocombustíveis, passando este a ser o 5º maior fornecedor de energia em 2017. Porém, tanto a energia hídrica como as restantes energias renováveis (eólica e solar) assumem ainda uma expressão consideravelmente menor quando comparadas com outras fontes. Em Portugal o panorama é diferente: o uso de biocombustíveis manteve-se constante desde 1990, mas em 2017 passa a ser o 3º maior fornecedor de energia. A energia hídrica varia de ano para ano, mas mantém-se relativamente baixa, tal como como as restantes renováveis que começaram a surgir em 2006. Em 2017 o total de energias renováveis (eólica e solar) contribui com quase a mesma quantidade de energia que a hídrica nos seus anos melhores.

## Avaliação de Soluções de Climatização aplicadas na Hotelaria para atingir a classificação nZEB

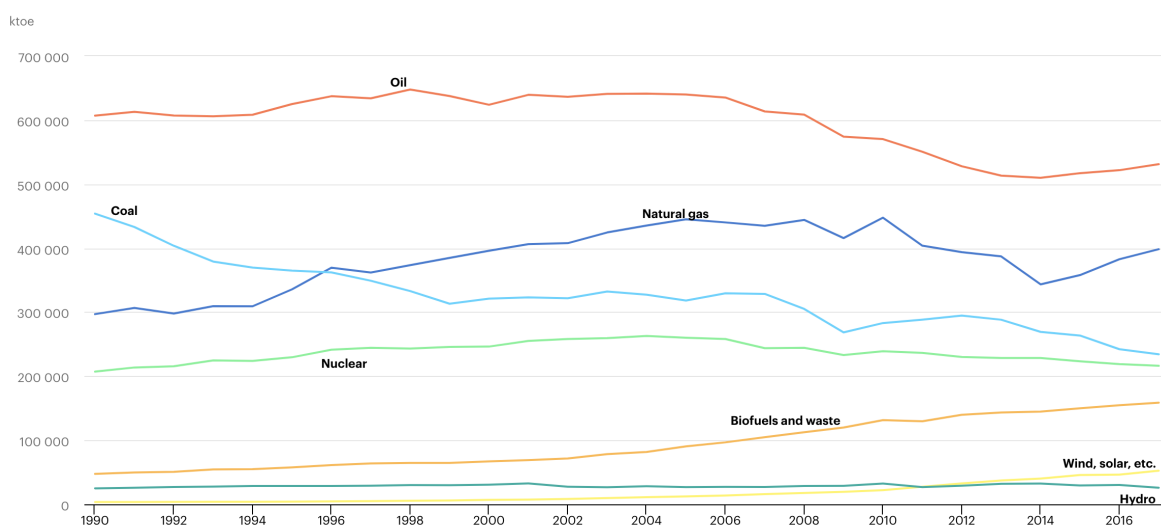


Figura 2.6: Fornecimento de energia total em energia primária na UE, por tipos de energia, em ktep [6].

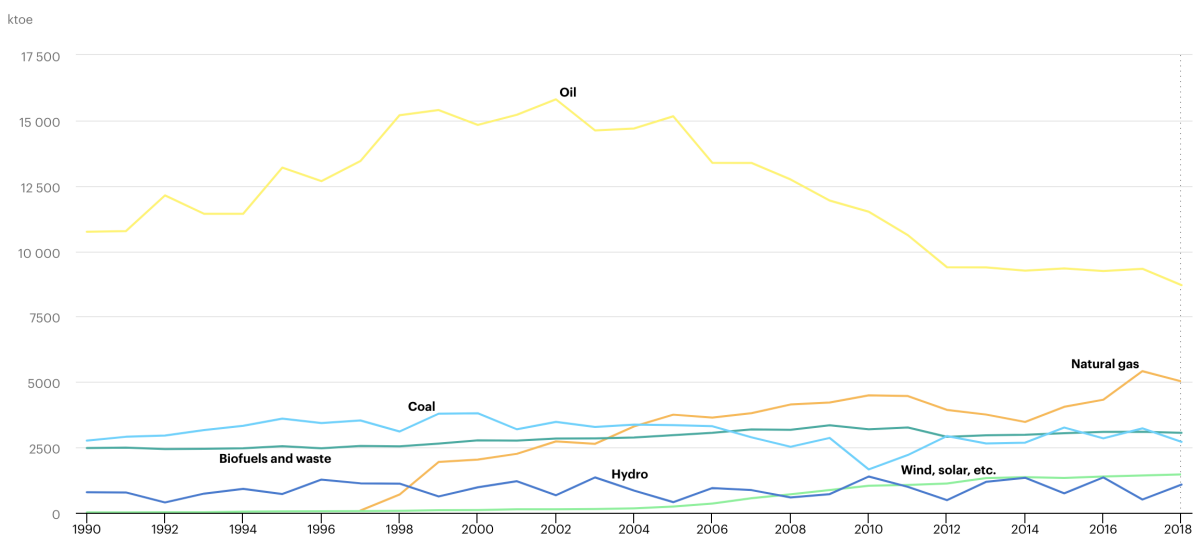


Figura 2.7: Fornecimento de energia total em energia primária em Portugal, por tipos de energia, em ktep [6].

Em termos de energia final são apresentados nas Figura 2.8 e 2.9 os consumos por setor em ktep para a UE e para Portugal, respetivamente, para o período 1990-2017.

## Avaliação de Soluções de Climatização aplicadas na Hotelaria para atingir a classificação nZEB

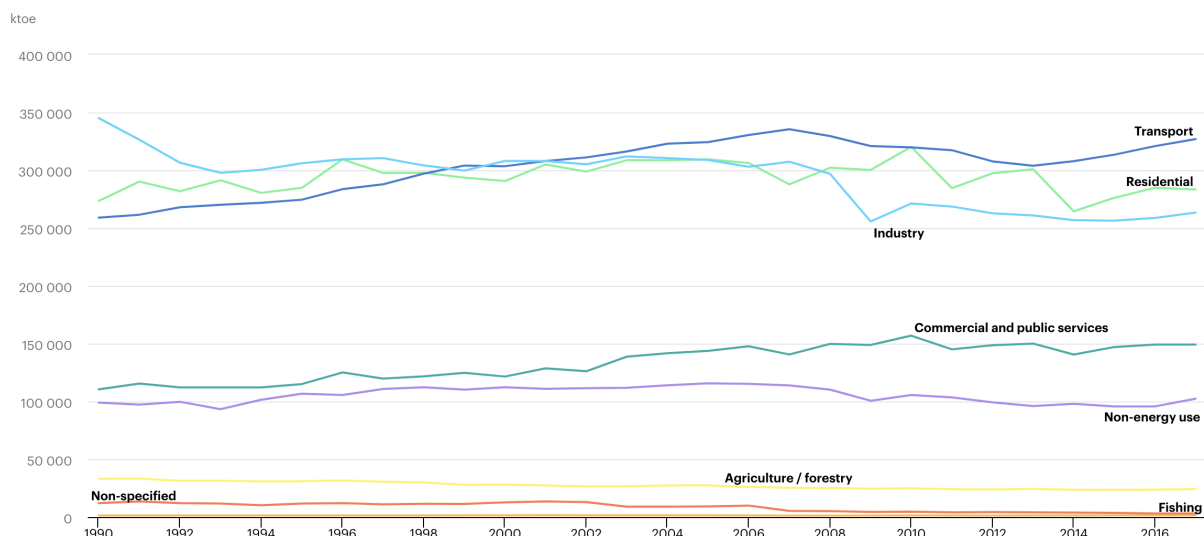


Figura 2.8: Consumo de energia final na UE por setor em ktep [6].

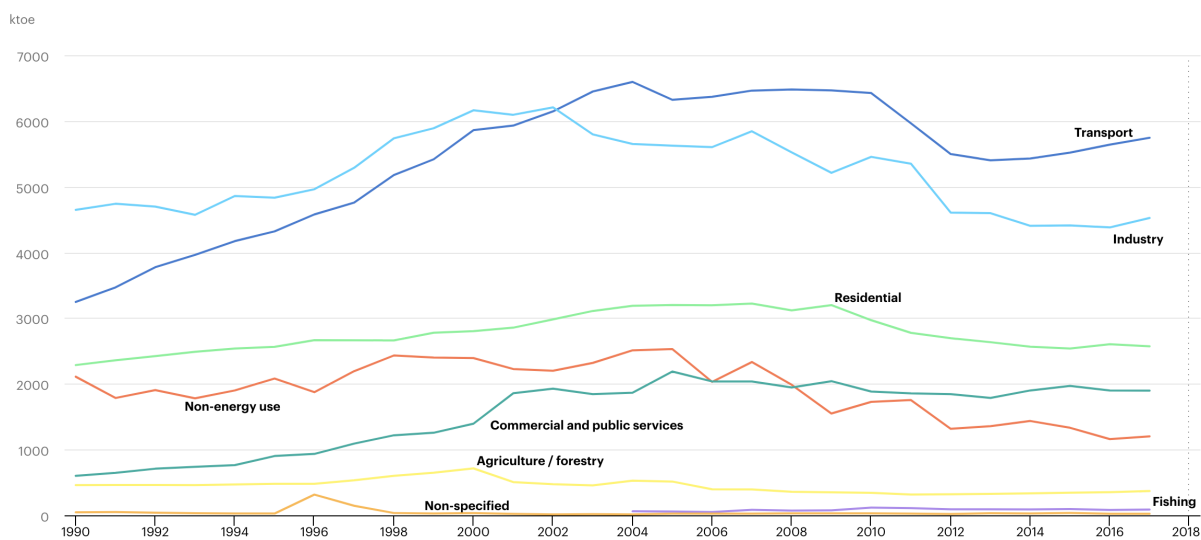


Figura 2.9: Consumo de energia final em Portugal por setor em ktep [6].

As Figura 2.10 e Figura 2.11 ilustram as distribuições percentuais, por setor energético na UE, e em Portugal, respetivamente, no ano de 2017.

Distribuição Percentual do Consumo de Energia Final por Setor na UE em 2017

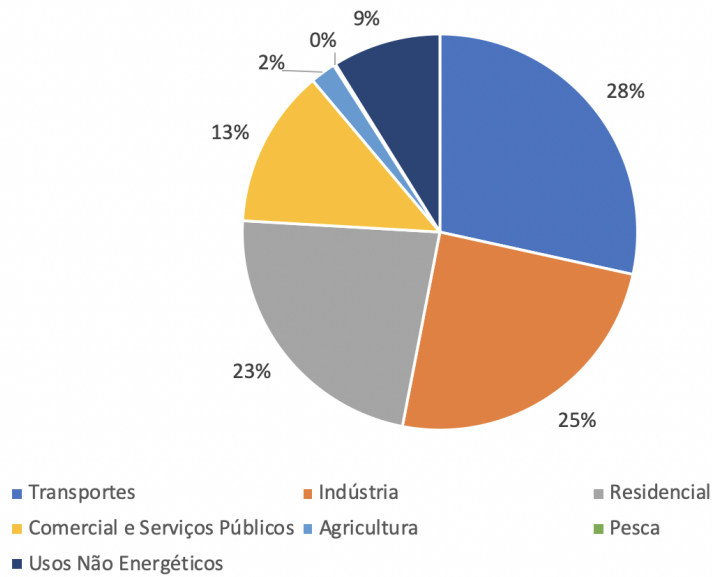


Figura 2.10: Distribuição percentual do consumo de energia final por setor na UE em 2017 (Adaptado de [6]).

Distribuição Percentual do Consumo de Energia Final por Setor em Portugal em 2017

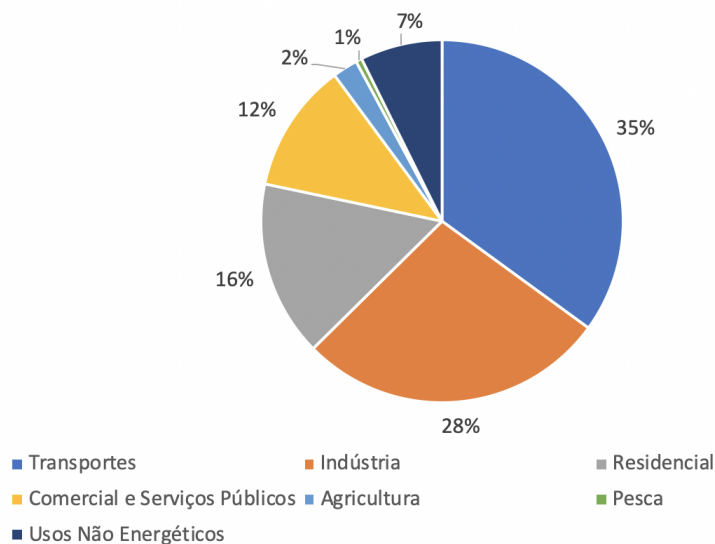


Figura 2.11: Distribuição percentual do consumo de energia final por setor em Portugal em 2017 (Adaptado de [6]).

Pela análise das Figuras 2.10 e 2.11 observa-se que no ano 2017 o setor residencial foi o terceiro a consumir mais energia, tanto na UE como em Portugal. Verifica-se uma margem

considerável de intervenção neste setor para potenciais melhorias com impacto significativo no consumo energético global.

Em Portugal, a parcela correspondente ao setor residencial é menor que na UE porque existe muito pouco investimento em conforto térmico, quando comparado com outros países europeus, em que as condições climáticas assim o exigem.

Por fim, analisa-se a evolução das emissões de CO<sub>2</sub> tanto na UE, como em Portugal. As Figuras 2.12 e 2.13 destacam a evolução das emissões totais de CO<sub>2</sub> na UE e em Portugal, respetivamente para o período entre 1990 e 2017.

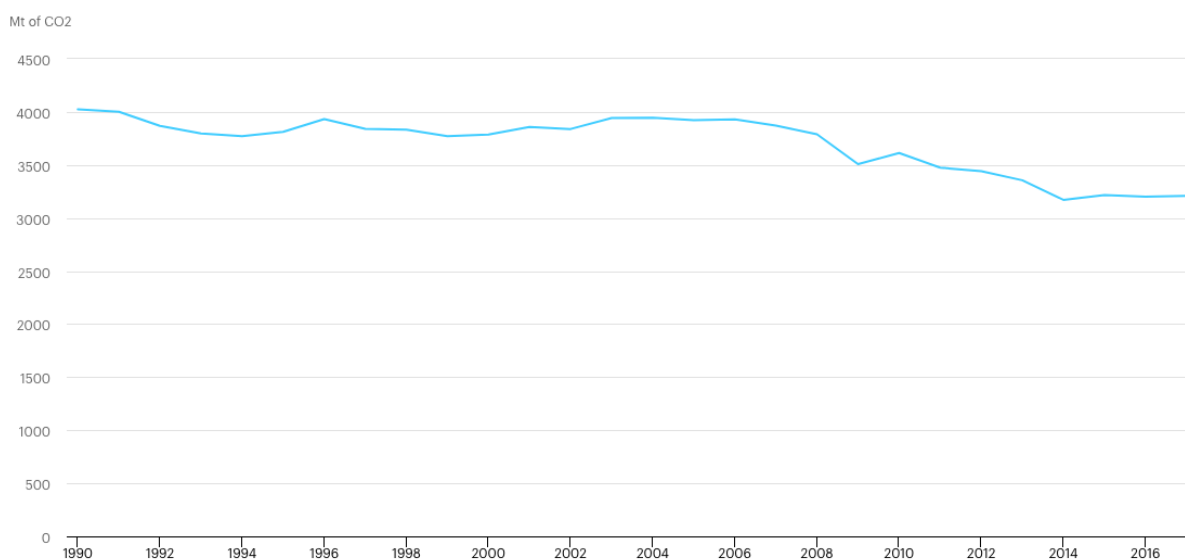


Figura 2.12: Evolução das emissões de CO<sub>2</sub> na UE, em Mton [6].

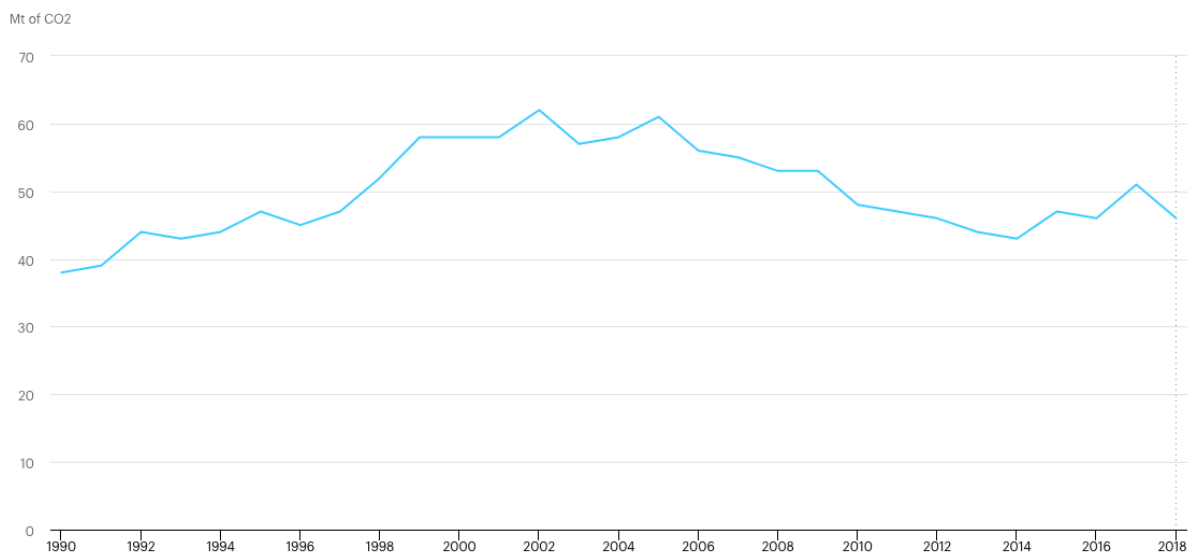


Figura 2.13: Evolução das emissões de CO<sub>2</sub> em Portugal, em Mton[6].

A UE foi capaz, de uma forma generalizada, reduzir as suas emissões de CO<sub>2</sub> entre 1990 e 2017, conseguindo uma diminuição do total das emissões de cerca de 20%. Já em Portugal o panorama é diferente. No período entre 1990 e 2002 as emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram significativamente (63%), devido ao crescimento industrial que ocorreu no país, numa altura em que as preocupações ambientais eram escassas. Porém, e desde então, verificou-se uma grande redução nas emissões de CO<sub>2</sub>, conseguindo uma redução de 26% entre 2002 e 2017. Esta diminuição nas emissões, tanto na UE como em Portugal, devem-se ao aumento considerável do contributo das fontes de energia renovável no *mix* energético, contrariando a tendência de aumento do consumo geral de energia. Sendo as condições de vida na UE consideradas bastante elevadas, e dado que a UE não integra países emergentes, a consciencialização em relação às preocupações ambientais assume, desta forma, um impacto significativo.

## 2.3 Caracterização do parque edificado Europeu e Português

Atualmente, o setor dos edifícios representa cerca de 40% do total do consumo de energia primária da Europa, existindo, no entanto, um grande potencial para a sua redução [7].

A UE juntamente com Noruega e Suíça, reúnem um total de 25 biliões de m<sup>2</sup> de espaço útil edificado (o equivalente à área da Bélgica) e 50% desse espaço está concentrado das zonas norte e oeste da Europa, como se observa na Figura 2.14, sendo o restante dividido pelas outras zonas (36% na zona sul e 14% na zona este) [8].

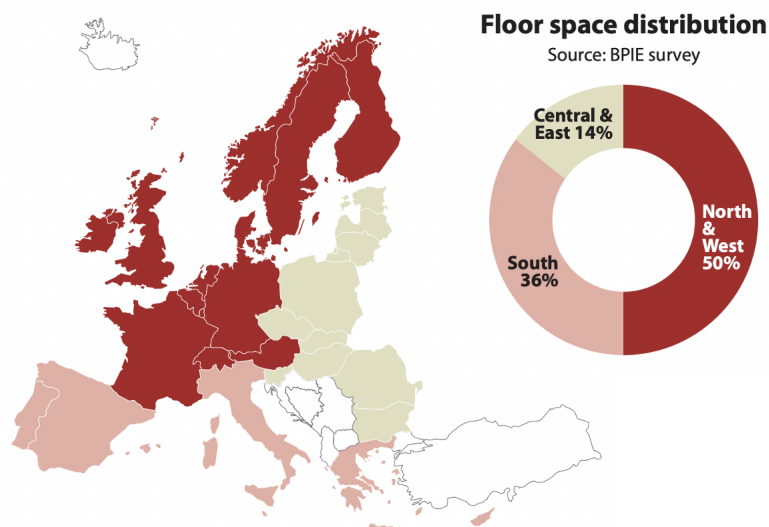


Figura 2.14: Distribuição do espaço útil dos edifícios pelo território Europeu [8].

Os edifícios de serviços - que representam 25% do total dos edifícios - apresentam configurações e usos muito heterogêneos. A Figura 2.15 representa a distribuição percentual do espaço útil dos edifícios de serviço em função do seu uso na Europa.

Considerando o global dos edifícios, verifica-se que o setor residencial é um dos maiores consumidores de energia. Em 2009, as casas europeias consumiam 68% da energia consumida em edifícios, para tal contribuindo a energia gasta no aquecimento, arrefecimento, água quente e equipamentos domésticos [8]. Uma reduzida eficiência neste setor, resulta numa maior fração do consumo total de energia. A Figura 2.16 ilustra a categorização dos edifícios residenciais na Europa pela data de construção por zona (sul, norte e oeste, e central e este).

Uma fração substancial dos edifícios existentes na Europa tem mais de 50 anos, existindo ainda hoje em dia, muitos edifícios em uso com centenas de anos. Os países com a maior quantidade de edifícios antigos são, por exemplo, o Reino Unido, Dinamarca, Suécia, França, República Checa, e Bulgária. Mais de 40% dos edifícios residenciais foram construídos antes da década de 1960, quando as regulamentações para a eficiência energética eram praticamente inexistentes. Entre 1961 e 1990, ocorreu um crescimento enorme na construção, que resultou na duplicação (em termos de área) do parque edificado [8].



Distribuição Percentual da área útil por uso em Edifícios de serviços na Europa

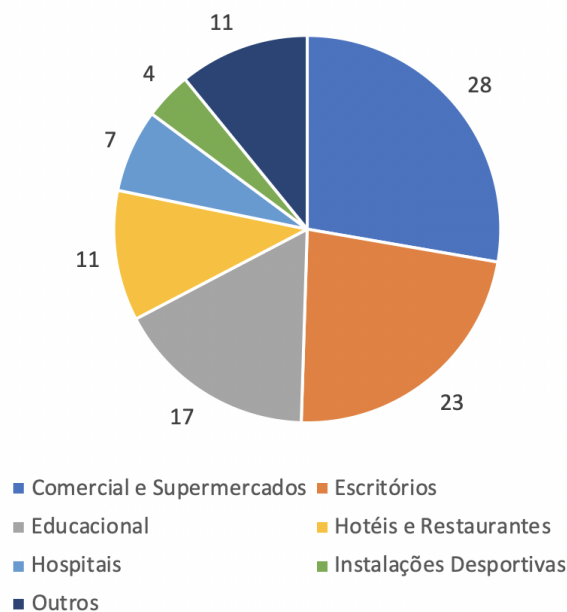


Figura 2.15: Distribuição percentual do espaço útil dos edifícios de serviço por uso na Europa (Adaptado de [8]).

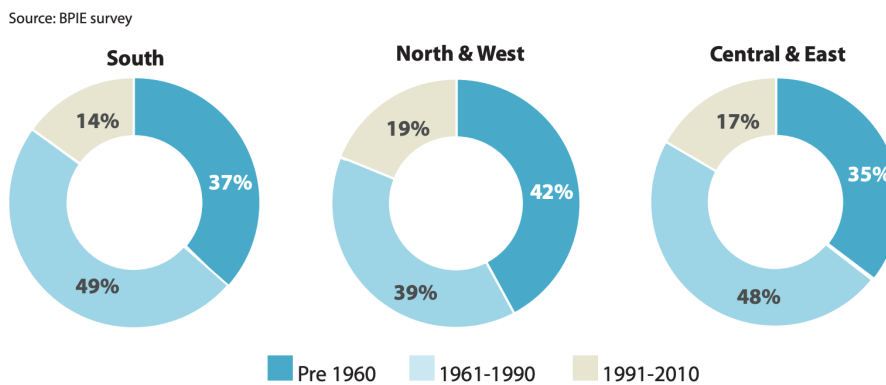


Figura 2.16: Categorização do parque edificado residencial na Europa pela data de construção [8].

O desempenho energético dos edifícios depende de muitos fatores, tais como a *performance* dos sistemas de aquecimento instalados, a envolvente térmica, as condições climáticas, etc... Os dados relativos ao consumo típico de aquecimento do parque edificado existente, tendo em consideração a sua idade, revelam que o maior potencial de redução do consumo energético está associado à fração dos edifícios mais antigos, em que, em alguns casos, edifícios da década de 1960 são piores do que os das décadas anteriores. Isto deve-se ao facto de nessa altura não se

dar muita importância ao isolamento térmico na envolvente térmica, refletindo-se nos valores do coeficiente global de transferência de calor da envolvente (U) [8].

Considerando as emissões de CO<sub>2</sub>, estima-se que 36% são produzidas por edifícios [8]. O valor das emissões específicas médias na Europa era, em 2010, 54 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> em 2010, e a Figura 2.17 mostra a distribuição das emissões específicas dos edifícios por país na Europa. Portugal é um dos países em que os edifícios emitem menos CO<sub>2</sub> por m<sup>2</sup>. A reduzida emissão de CO<sub>2</sub> não parece estar associada a uma extrema eficiência do parque edificado português, mas sim ao facto de não existirem grandes preocupações no conforto térmico dos edifícios, e o clima também não ser extremo em nenhuma altura do ano, de forma a consumir tanta energia. Já Espanha que tem um clima semelhante a Portugal, tem ainda menos emissões específicas, o que pode ser devido à maior eficiência dos edifícios em Espanha.

Para além da eficiência energética, as emissões de CO<sub>2</sub> existem outros fatores com muito peso nesta variável, como a forma como a energia renovável está a ser aproveitada pelos edifícios, o uso de aquecimento central (*district heating*) e cogeração. As variações no *mix* energético têm uma influência elevada no desempenho, em termos de emissões, dos edifícios. Alguns dos países com menores emissões na Figura 2.17 como a Noruega e a França têm estes valores porque dependem muito de energia nuclear [8].

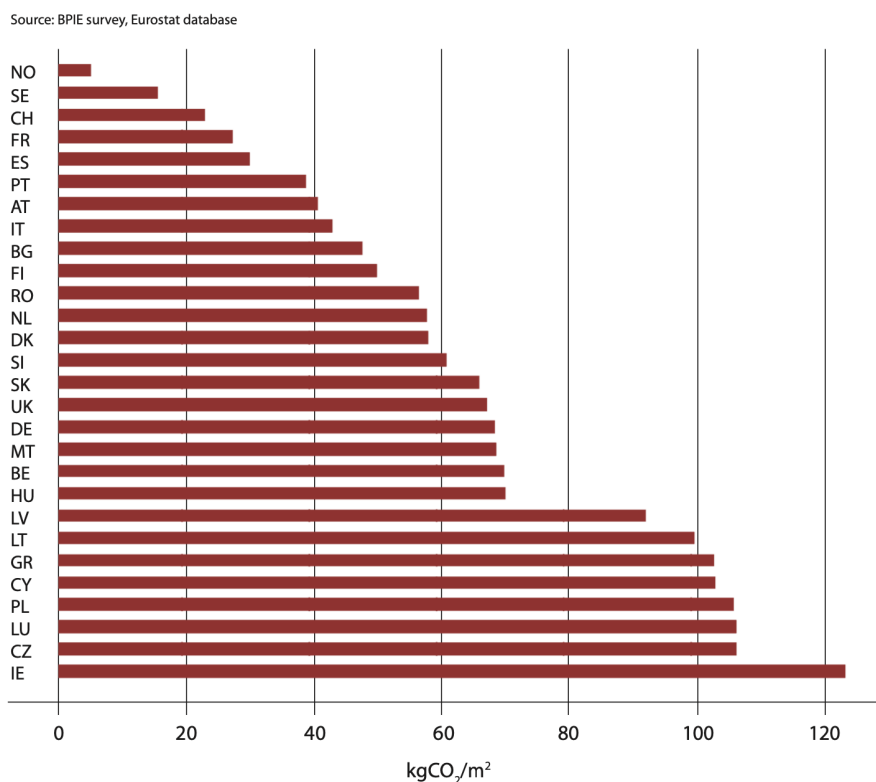


Figura 2.17: Distribuição das emissões específicas de CO<sub>2</sub> dos edifícios por país da Europa em kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> [8].

Em Portugal, um dos maiores problemas nos edifícios é a sua "pobreza energética", e a renovação destes deve considerada como uma oportunidade para a diminuir. Este conceito está relacionado com a incapacidade de atingir certos níveis de conforto térmico através de aquecimento ou arrefecimento adequados, por razões económicas. De acordo com o BPIE (*Buildings Performance Institute of Europe*), existem três fatores determinantes que estão na origem da "pobreza energética" sendo eles: baixos rendimentos, baixa eficiência térmica do edifício, e elevados custos de energia [9]. Em 2011 Portugal era o segundo país da Europa com maior taxa de mortes excessivas no inverno (25,9%), quase o dobro da média europeia 13,9% [10].

A reabilitação dos edifícios em Portugal tem vindo a aumentar, não sendo, no entanto, a primeira opção - por ser substancialmente mais dispendiosa quando comparada com a construção nova, e por não existirem até hoje políticas específicas para a diminuição da "pobreza energética". A Figura 2.18 identifica o número de obras concluídas em Portugal desde 1995, evidenciando a maior proporção de construção nova. Em 2015, tanto a construção nova, como a reabilitação atingem valores mínimos, aproximando-se as duas parcelas entre si, o que pode ser justificado pela crise económica instalada no país, ou a elevada área construída existente, e não às mudanças de políticas. Em 2015 o número de construções novas corresponde apenas as 15% do número destas em 2003 [9].

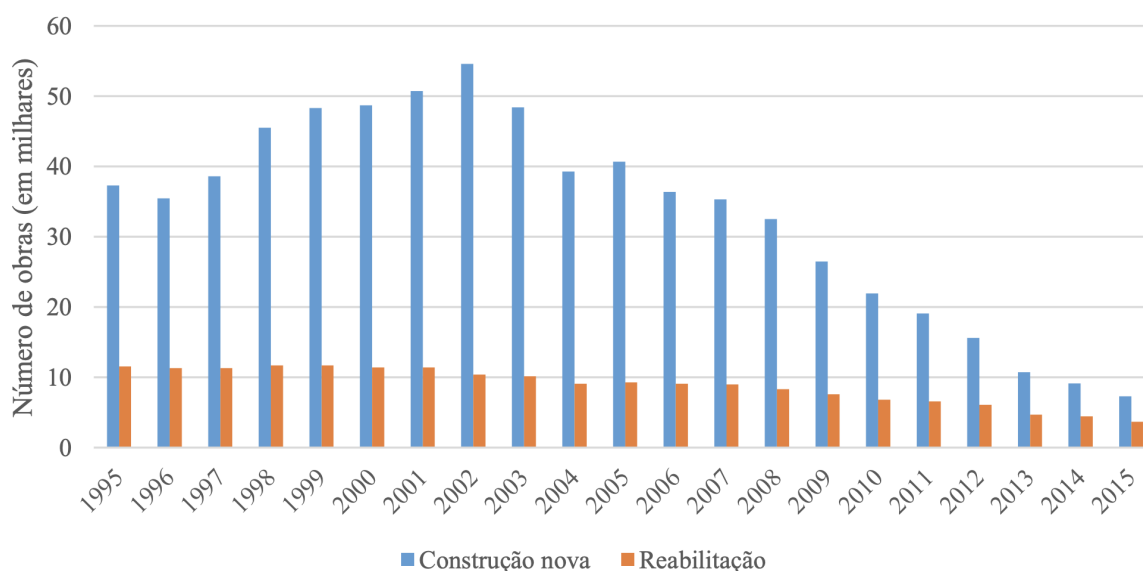


Figura 2.18: Evolução do número de obras concluídas em Portugal entre 1995 e 2015 [9].

A Figura 2.19 destaca a distribuição percentual de energia pela área útil nos edifícios de serviços em Portugal. Porém, esta distribuição não tem em consideração os espaços comerciais nem os escritórios, pois segundo a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), estes

devem estar apresentados noutra categoria [9]. Verifica-se que a maior fração de edifícios de serviços em Portugal, em termos de área, é a dos estabelecimentos de educação (49% resultante do somatório da área do ensino pré-escolar ao secundário e a área correspondente ao ensino universitário, 44% e 5%, respetivamente).

Quando considerado o período de construção destes edifícios, verificou-se que os estabelecimentos de educação integravam os edifícios mais antigos, e, em oposição, o setor hoteleiro foi o que apresentou a maior fração de edifícios construídos a partir de 2006, tal como ilustrado na Figura 2.20. Esta distribuição não é favorável à eficiência energética, e isso é provado pelo facto de 39% dos certificados energéticos serem inferiores ou iguais a D [9].

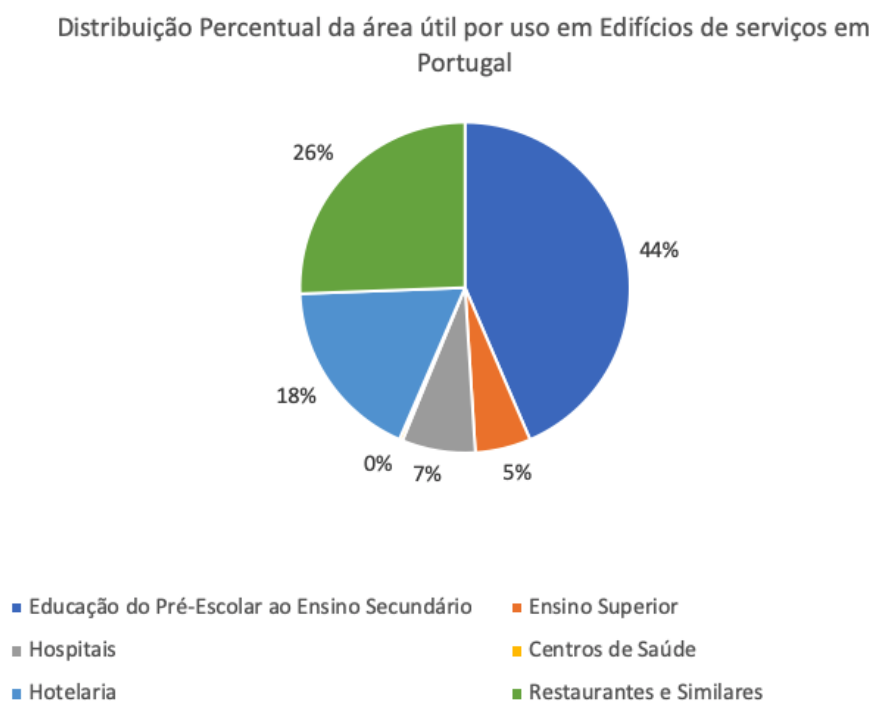


Figura 2.19: Distribuição percentual da área útil dos edifícios de serviço por uso em Portugal, em função da sua utilização (Adaptado de [9]).

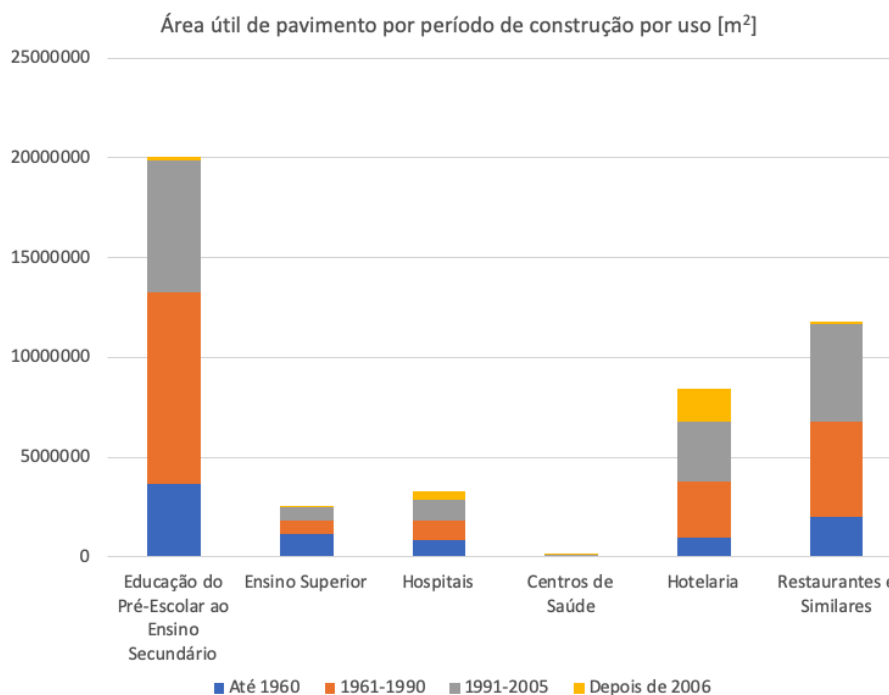


Figura 2.20: Distribuição da área útil dos edifícios de serviço por uso em Portugal por altura de construção em [m<sup>2</sup>] (Adaptado de [9]).

## 2.4 NZEB e legislação

### 2.4.1 Caracterização da família ZEB

O setor imobiliário é um dos setores-chave para atingir os objetivos 20/20/20 da UE [?]. Outro dos grandes objetivos da união é diminuir a emissão dos gases com efeito de estufa, no setor residencial e serviços, pretendendo-se uma redução entre 88% e 91% entre 1990 e 2050. Neste sentido, foram estipulados dois mecanismos para o desenvolvimento do setor imobiliário:

- **O princípio dos nZEBs** — De acordo com a EPBD, um edifício nZEB é um edifício com uma eficiência energética muito elevada, cujas necessidades energéticas são garantidas quase completamente por fontes renováveis de energia. Até 31 de dezembro de 2020, todos os edifícios novos têm que ser nZEBs e até 31 de dezembro de 2018, todos os edifícios públicos têm que ser nZEBs;
- **O princípio da otimização de custos** — O que permite guiar e criar os requisitos para a eficiência energética dos edifícios novos e edifícios existentes sujeitos a grandes renovações [11].

O conceito ZEB tem ganho reconhecimento nos últimos anos graças aos objetivos de eficiência energética impostos pelas novas legislações a partir de 2019. Este tipo de edifícios já é visto como uma solução realista para a redução das emissões de gases com efeito de estufa e do desperdício energético no sector imobiliário. [12]

Apesar dos objetivos internacionais para a implementação do conceito dos ZEBs e dos nZEBs, falta uma definição clara e objetiva, bem como o desenvolvimento de um método computacional para avaliar o balanço energético.

Segundo a literatura, o termo "energia líquida" ou "*net energy*" é maioritariamente usado para descrever o balanço entre a energia consumida pelos ocupantes e sistemas do edifício, e a energia produzida pelos sistemas energéticos de fontes renováveis, aplicado a um NZEB [13].

Porém, este conceito na sua forma original, como é utilizado na área da economia ecológica, tem um significado diferente. Está relacionado com todo o ciclo de vida do edifício contabilizado, e tem-se vindo a desenvolver ao longo de mais de um século, sendo, atualmente, um tópico muito discutido na área das energias renováveis e biocombustíveis.

Tipicamente, a avaliação energética considera apenas o uso de energia na forma de eletricidade ou combustíveis fósseis para a operação de um edifício, sem contabilizar os contributos energéticos para a construção do edifício, assim como no fabrico dos materiais. Algumas formas de certificação voluntárias como o *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) e o *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM) têm em consideração uma maior perspetiva do que apenas o consumo anual de energia e incluem componentes como a seleção do material, o transporte, etc... [13]

Nas últimas décadas, alguns autores optam por uma abordagem mais direta: a aplicação do conceito de "*net energy*", considerando a energia compreendida tanto nos edifícios como nos seus materiais constituintes [14].

Para denominar os edifícios com um balanço energético nulo ao longo do ciclo de vida, usa-se na abreviatura o termo *life cycle zero energy building* (LC-ZEB), em que a energia primária no edifício é a usada na operação, mais a compreendida no edifício e nos seus materiais constituintes, e sistemas, ao longo do seu ciclo de vida, que tem que ser igual ou menor que a energia produzida pelos seus sistemas de energia proveniente de fontes renováveis ao longo do do ciclo de vida [13].

Na Europa existe uma grande variedade de conceitos para NZEBs, dependendo de país para país. Existem exemplos não governamentais que enfatizam aspetos diferentes, como o "*zeroHaus*", o "*Plusenergiehaus*", "*Minergie*<sup>©</sup>", ou a "*Passivhaus*", que vai ser estudado posteriormente. De uma forma geral, estas abordagens têm como objetivo um balanço energético anual mais ou menos equivalente. Os métodos de cálculo não estão necessariamente na mesma linha que EPBD. Existem métricas diferentes (energia no local, fonte de energia, emissões de CO<sub>2</sub>), assim como as fronteiras dos balanços e as formas de normalização [11].

Foram comparados vários edifícios, que pertencem a uma base de dados desenvolvida pela Universidade de *Wuppertal*, e encontraram-se muitas diferenças tanto no balanço energético como no balanço de emissões. Como já foi referido anteriormente, tais diferenças podem ser explicadas pelas variadas condições climáticas que se fazem sentir na Europa, entre outras coisas. Porém, é essencial caminhar para uma definição consistente com a legislação europeia. E assim foram criados requisitos aplicáveis para cada caso específico de forma a uniformizar o estudo de cada edifício nZEB [11].

As definições dos edifícios a energia zero (ZEB) são maioritariamente baseadas no consumo anual de energia, tendo em consideração o conjunto de operações de um certo edifício. Estas operações são: aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação, etc...

O termo "*net-zero energy*" - energia líquida zero - é frequentemente utilizado para apresentar o balanço anual de energia de um edifício conectado à rede, mas não considera os contributos energéticos utilizados para a construção do edifício, nem dos seus materiais.

As primeiras tentativas para atingir a energia zero tinham como objetivo atingir a meta da necessidade nula de aquecimento, como a Casa Solar 1 do MIT, construída em 1939 que incluía uma grande área com coletores solares e um reservatório de água quente [15]. Este tipo de exemplos contribuíram para as abordagens atuais, tendo como princípios o isolamento térmico elevado, boa estanquidade, ventilação com recuperação de calor, como é falado no "*PassivHaus*" na Alemanha, por exemplo, e serviram de exemplos para outros países.

Contudo, estas práticas não correspondem ao conceito de energia zero, mas conseguem reduções de consumos de aquecimento, usando uma abordagem prática e económica, o que é um bom primeiro passo para o ZEB.

Atualmente, a abordagem mais comum para o ZEB é utilizar a rede elétrica como a fonte de corrente e descarga de eletricidade, evitando, assim, sistemas de armazenamento locais. O termo "*net*" é utilizado em edifícios conectados à rede para definir o balanço energético entre a energia usada e a vendida, e o termo "*net-zero energy*" é utilizado quando este balanço é igual a zero [13].

Um NZEB pode ser um edifício residencial ou comercial, cujo balanço líquido de energia é nulo. Isto significa que o total da energia consumida pelo edifício durante um ano é compensado pela energia proveniente de fontes renováveis produzidas no local [3].

Edifícios autónomos e edifícios conectados podem ser comparados, e chega-se à conclusão que um edifício conectado tem um melhor desempenho, ao longo do ciclo de vida, do que o autónomo, sendo as diferenças mais significativas para edifícios não domésticos, por os consumos serem maiores [3].

De acordo com a Diretiva Europeia para 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD), um edifício nZEB é um edifício que resulta de um nível de eficiência

energética muito elevado, o total do consumo de energia primária é igual ou inferior à produção de energia proveniente de fontes renováveis locais [2].

Um nZEB tem um desempenho energético muito elevado. Necessita de uma quantidade de energia baixa e esta é coberta na sua quase totalidade por energia proveniente de fontes renováveis. As fontes podem ser no local (como é no caso dos painéis fotovoltaicos, por exemplo) ou podem ser produzidas "perto" (como é o caso de redes de aquecimento urbano, muito utilizadas nos países do norte da Europa) [2].

O objetivo primário da avaliação dos (NZEBs) é a quantificação do impacto destes na energia e no ambiente. Para isso, é necessário clarificar a definição e as medidas de eficiência de energia. [16] Quanto à definição, não há consenso pois depende dos objetivos do projeto em causa, do local do edifício, etc... Contudo, com a investigação que tem sido desenvolvida nos últimos anos, tem-se determinado critérios, métricas e elementos pelos quais se pode seguir quando aplicados a um tipo de situação [16].

Os elementos base do NZEB são: o sistema do edifício, a rede energética e o sistema de equilíbrio. O esquema representado na Figura 2.21 ajuda a entender.

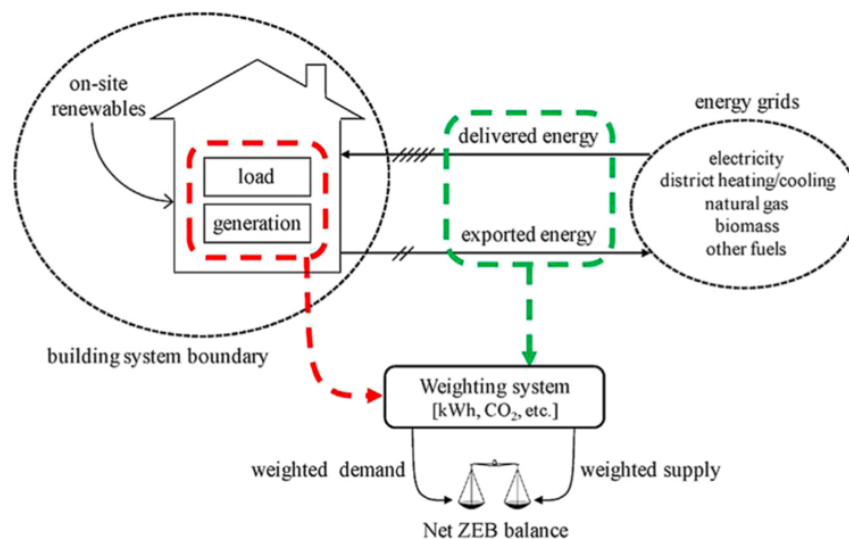


Figura 2.21: Estrutura do sistema e elementos básicos de um NZEB [17]

De forma a atingir o objetivo líquido nulo de energia, é necessário clarificar uma fronteira para o sistema do edifício com uma fonte renovável local. Dentro desta fronteira, o sistema consome da fonte renovável sob a forma de eletricidade, por exemplo. O excesso de energia vai para a rede. Há várias formas de fazer este peso porque também há vários objetivos de projeto. Por exemplo, os donos dos edifícios normalmente dão preferência aos custos energéticos, por isso, o seu sistema de equilíbrio vai pesar mais o balanço de custos do que o balanço energético.



Dado que o princípio central da definição dos NZEBs é um equilíbrio ponderado entre a procura e a oferta energética, vários equilíbrios diferentes podem surgir, resultando em várias conclusões de avaliação. Uma solução integrada passando pelo balanço anual pode não passar pelo balanço líquido nulo todos os meses. Assim, a energia líquida pode ser representada pela expressão 2.1:

$$\frac{E_L}{A_p} = \sum_i Energia_{nec}(i) * F_{nec} - \sum_i Energia_{prod}(i) * F_{prod} \geq 0 \quad (2.1)$$

Em que:

- $E_L$  é a energia líquida total em [kWh/ano];
- $A_p$  é a área útil do espaço em [m<sup>2</sup>];
- $Energia_{nec}$  é a energia necessária para o funcionamento do edifício em [kWh/ano];
- $Energia_{prod}$  é a energia produzida no edifício em [kWh/ano];
- $F_{nec}$  é o fator de conversão de energia necessária para a energia necessária [kWh<sub>EP</sub>/kWh];
- $F_{prod}$  é o fator de conversão de energia produzida para a energia produzida [kWh<sub>EP</sub>/kWh];

Esta expressão é muito utilizada como base para o cálculo da eficiência energética e foi introduzida pela *Federation of European Heating Ventilation and Air Conditioning Assotiations* (REHVA) [18].

Existem três tipos de medidas de eficiência energética, como se pode aferir no gráfico presente na figura: o projeto passivo, o sistema de serviços e a geração de energia a partir de fontes renováveis. [16].

O projeto de arquitetura passiva é muito importante pois tem o potencial de diminuir as necessidades térmicas e necessidades elétricas do edifício. Assim, necessita-se de uma orientação otimizada, um bom isolamento térmico para uma envolvente funcional, uma boa estanquidade e sombreamentos bem desenhados.

Para diminuir, ainda mais, as necessidades energéticas do edifício são, ainda, necessários equipamentos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), de água quente sanitária (AQS), sistemas de iluminação, etc... o mais eficientes possível, pois estes podem sobrecarregar muito a fatura energética do edifício.. Os vários equipamentos instalados no edifício consomem energia que pode ter várias fontes. Aqui surge a ideia de *Building Energy System* (BES), em que a capacidade energética instalada no edifício por fontes renováveis é suficiente para cobrir as necessidades energéticas deste. Isto é possível através de sistemas integrados como a trigeriação, bombas de calor ou combinação painéis solares e fotovoltaicos. Assim, estes sistemas produzem

calor e energia elétrica. É possível obter edifícios com 100% de fonte energética renovável [19]. O gráfico na Figura 2.22 mostra os vários elementos a considerar aquando do projeto de um NZEB [16].

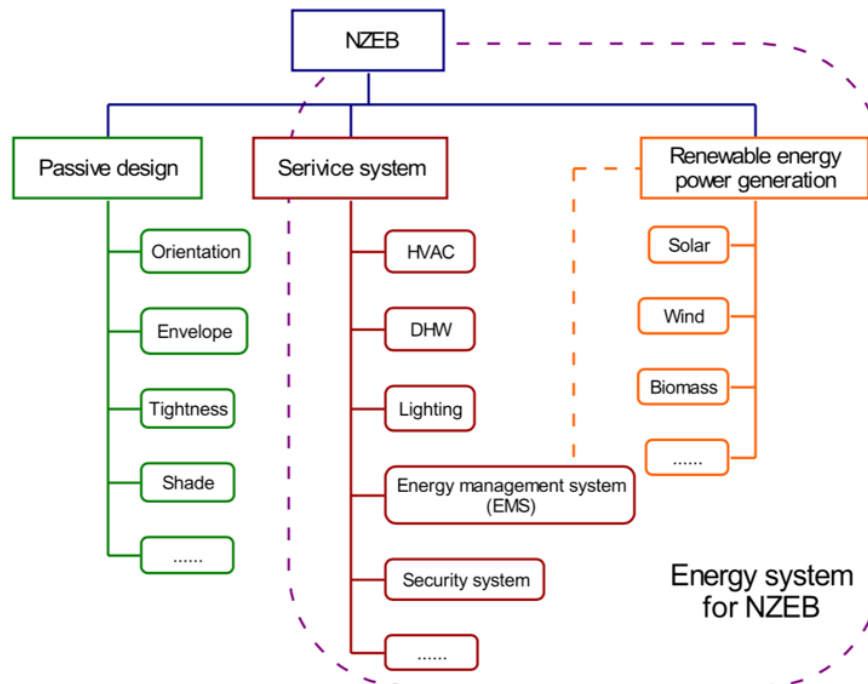


Fig. 5. Design elements for NZEB.

Figura 2.22: Elementos a considerar para o projeto de um NZEB [16]

É possível obter edifícios com 100% de fonte energética renovável, de acordo com as medidas explicitadas na Figura 2.22.

## 2.4.2 Legislação Europeia

A Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, conhecida como EPBD é a legislação europeia mais importante na área dos edifícios sustentáveis. Em 2018, esta Diretiva foi alterada pela Diretiva 2018/844/EU, passando esta a ser a nova EPBD. A UE está empenhada em desenvolver um sistema energético competitivo e reduzir ao máximo emissões de gases com efeito de estufa, para conseguir um resposta efetiva às alterações climáticas. O grande objetivo é a descarbonização até 2050. Para o alcançar, foram estabelecidos objetivos intermédios a curto (2030), médio (2040), e longo (2050) prazos [20].

O Acordo de Paris de 2015 veio introduzir alterações legislativas de forma a potenciar os esforços da UE para a descarbonização do parque imobiliário. Quase metade da energia final consumida na UE é utilizada para fins de aquecimento e arrefecimento, e 80% desta é utilizada em edifícios. Assim sendo, a concretização destes objetivos é muito relevante, pois o impacto é importante.

Neste contexto de descarbonização são destacadas medidas que garantam edifícios existentes, sujeitos a renovação a longo prazo, realizem os progressos necessários para se transformarem em nZEB. Os Estados-Membros (EM) devem dar orientações claras, definir ações, bem como facilitar o financiamento para ajudar a introduzir estes requisitos de desempenho [20].

A diretiva também salienta ainda que as medidas destinadas a melhorar o desempenho energético dos edifícios não se podem concentrar apenas na envolvente, mas que devem incluir todos os elementos e sistemas técnicos pertinentes, como os elementos passivos e o uso de energia para iluminação e ventilação, influenciando o conforto térmico e visual.

Há, também, referência a planeamento de soluções baseadas na natureza, como coberturas e paredes “verdes”, proporcionando isolamento e sombra os edifícios, e reduzindo a necessidade energética. Foi inserido um Artigo (2º-A) que estabelece a obrigatoriedade de uma estratégia de longo prazo para apoiar a renovação, até 2050 dos edifícios residenciais e não residenciais para uma descarbonização e transformação em nZEB [20].

De acordo com a EPBD, os EM devem fazer o esforço para dinamizar a implementação dos nZEBs nos seus países. A *PassivHaus* é um exemplo de tal esforço já realizado por alguns estados mais a norte. O mesmo não se passa nos países do sul da Europa, onde se discutem as soluções mais adequadas, quer para o clima e cultura locais, quer para o seu contexto técnico-económico [21].

A EPBD também introduz um requisito que implica atuar, em primeiro lugar, na envolvente do edifício de forma a satisfazer o mais possível as necessidades térmicas [2]. Todos os EM da UE têm que se envolver num maior desdobramento de nZEBs até 2020, para além de elaborar planos para aumentar o seu número. Estes planos incluem objetivos que visam um aumento de sub-categorias, por exemplo, podendo assim responder a um mercado mais alargado. Estas medidas tornam a UE líder na regulamentação e adaptação aos nZEB e aos NZEB [21].

Para atingir altas eficiências em edifícios, é necessária uma redução ambiciosa de energia e de emissões de carbono para um nZEB comum com indicadores especificados. São fundamentais definições claras dos níveis de energia e dos métodos de cálculo/medição, assim como estão explicitados na EPBD. Para uma melhor compreensão, a Figura 2.23 clarifica os níveis energéticos de acordo com a norma EN15603 apenas para a estação de aquecimento, para uma melhor compreensão.

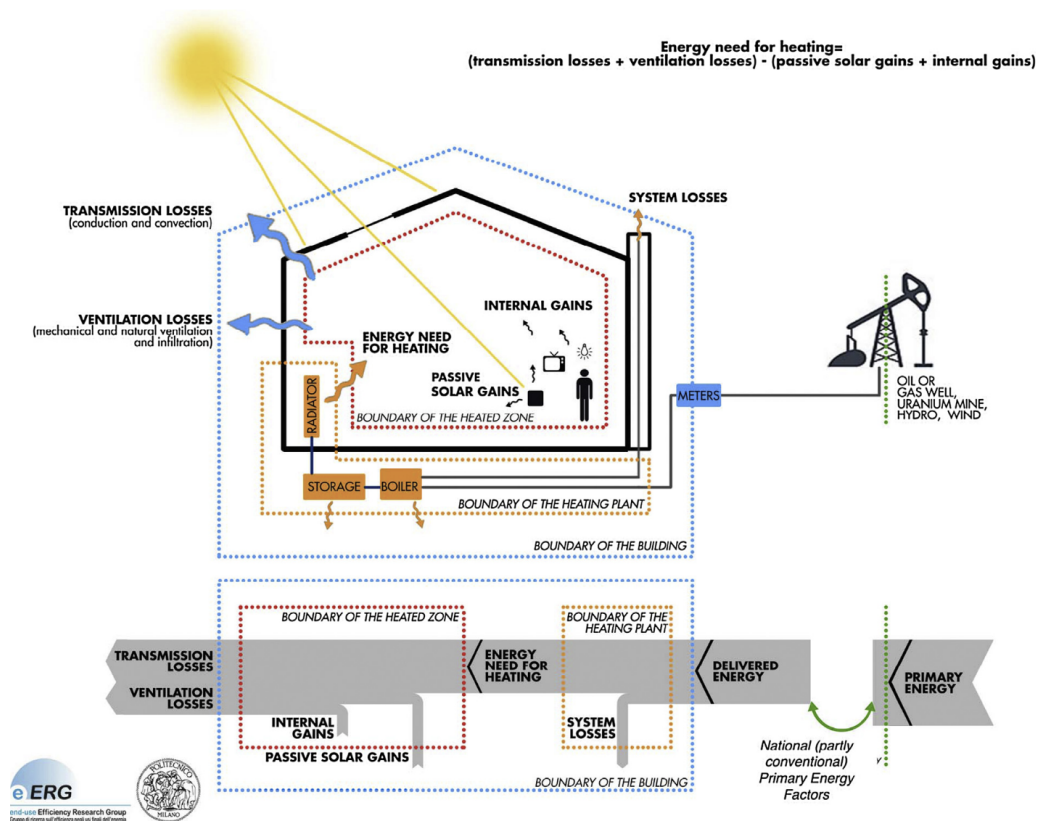


Figura 2.23: Representações dos níveis energéticos de acordo com os standards da norma EN150603 [22].

Deste modo, é fácil entender que a energia necessária para o aquecimento é igual às perdas por transferência de calor (convecção e condução), assim como as perdas por ventilação (infiltrações e ventilação mecânica), menos o total dos ganhos internos mais os ganhos solares passivos (e ativos como é o caso nos países do sul da Europa). Assim, a energia necessária para o sistema é igual à energia primária entregue (na energia presente na rede ou no sistema de energia renovável), menos as perdas do sistema (que se podem ser devidas ao transporte, sistemas energéticos etc...) [21].

Vários países europeus optam por cumprir o *standard* da *PassivHaus* (PH) que garante cargas térmicas, tanto de aquecimento, como de arrefecimento inferiores a 15 kWh/(m<sup>2</sup>/ano). Porém, este requisito é visto como impraticável por vários países, pela elevada tecnologia envolvida na sua implementação. O desafio não está apenas na construção nova, mas também na renovação [11, 21].

A relação entre desempenho térmico e conforto está explicitamente mencionada na EPBD. [22] Os requisitos PH ditam que o critério para o conforto de verão é "o número de horas que ultrapassam os 25°C não devem exceder 5% do tempo operacional". Porém, aplicando este

critério não é possível obter os resultados que se esperariam nos climas da Europa do sul, mesmo com boa qualidade de construção, pois a temperatura exterior é substancialmente mais elevada. Se a envolvente do edifício não for melhorada, não é possível atingir os níveis de conforto indicados pela PH que indicam que "o conforto de verão pode ser atingido apenas recorrendo a melhorias passivas, sem um sistema de arrefecimento passivo". Em Portugal, com uma envolvente comum, e soluções construtivas típicas, resultam períodos longos de desconforto térmico tanto para o inverno como para o verão [23].

Nos países nórdicos, o clima é dominado pela necessidade de aquecimento, pelo que os edifícios são feitos para eliminar o arrefecimento ativo, utilizando o arrefecimento passivo, e reduzindo-se os custos e a manutenção. É possível atingir as condições de conforto durante o verão e concentrar o projeto para o esforço de reduzir as cargas térmicas de aquecimento, tendo apenas um sistema para resolver, otimizando os custos.

Já nos países do sul da Europa, a problemática é completamente diferente, pois as temperaturas de verão são consideravelmente mais altas, assim como a radiação solar, sendo necessário um equilíbrio entre as cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, de forma a colmatar as necessidades de conforto de inverno e verão. Assim, a probabilidade de instalar dois tipos de sistemas (ativos, passivos, ou híbridos) aumenta, sendo necessário suportar os custos financeiros acrescidos [21].

Sistemas de arrefecimento passivos como tubagens enterradas, ventilação, arrefecimento evaporativo ou ventilação noturna também estão disponíveis mas necessitam maior tratamento de agentes de poluição do ar exterior. Com a redução da condutividade térmica da envolvente, a redução das infiltrações, a otimização dos sombreamentos, e das aberturas das janelas é possível diminuir significativamente a carga térmica de inverno. Se a estas medidas for adicionado um mecanismo de ventilação com recuperação de calor eficiente é possível atingir valores de necessidades térmicas de inverno de aproximadamente 5 kWh/(m<sup>2</sup>/ano), um valor impossível de atingir em climas frios [21].

Porém, o mesmo não é possível nas necessidades térmicas de verão, em que as necessidades térmicas vão ser muito provavelmente superiores às impostas pelos valores da PH, graças à radiação solar, temperatura elevada do ar exterior, bem como o efeito de ilhas térmicas presente em algumas cidades. Assim, uma definição de nZEB tem que ter em consideração um balanço aquecimento-arrefecimento para cada zona climática e requisitos para eficiências energéticas de sistemas passivos ou ativos [21].

Existem países da UE, como a França e o Chipre, que definiram valores de consumo máximo de energia primária específica na ordem dos 100 [kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.ano], mas a maior parte dos países europeus não têm tais valores fixos, sendo necessário recorrer a uma comparação com uma referência [21].

### 2.4.3 Legislação Portuguesa

A regulamentação Portuguesa adaptou a EPBD e apresenta uma definição de nZEB em que este é um edifício que usa a melhor relação custo-benefício para a envolvente e onde energia renovável pode ser produzida localmente, ou perto, e é usada para cobrir parte significativa das restantes necessidades energéticas. Todavia, a definição de nZEB não está ainda completa, pois a regulamentação atual não apresenta requisitos específicos.

Os requisitos da PH não são considerados como referência, principalmente por causa da sua dependência em ventilação mecânica com recuperação de calor e estanquidade. Os invernos moderados não justificam, em termos de custo financeiro, o investimento dos requisitos PH.

Estudos recentes documentam que apesar do risco de sobreaquecimento durante o verão, a arquitetura típica portuguesa permite atingir conforto térmico interior por meios passivos e ação dos ocupantes durante o verão [35].

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) desenvolveu um modelo adaptativo de conforto térmico, que é uma adaptação do ASHRAE *Standard 55* e da norma EN15251 adaptados ao contexto português.

O setor de fotovoltaicos (PV) em Portugal é maioritariamente controlado por instalações pequenas. Desde 2014 foram criados incentivos financeiros (redução de impostos) para promover a micro e mini geração. O principal incentivo, agora, é estimular o regime de auto-consumo com a redução da burocracia [21].

Para determinar os dados em falta para Portugal, relativos às necessidades de aquecimento e arrefecimento, à semelhança do requisito PH, foram realizadas simulações estudos dinâmicos. Para um edifício ser considerado nZEB em Portugal continental, estabeleceu-se um limite de 33 [kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.ano] de consumo de energia primária, com uma percentagem de 50% de energias renováveis no balanço energético [21]. Estes valores são baixos porque em Portugal o clima é ameno e as necessidades de aquecimento não são muito elevadas, assim como as de arrefecimento. Todavia, permanecem valores hipotéticos.

A legislação portuguesa é dada pelo Decreto Lei 118/2013 [32] que usa como base a Diretiva nº 2010/31/UE (EPBD) [2] do Parlamento Europeu e Conselho, que já foi analisada.

#### 2.4.3.1 Decreto-Lei 118/2013

O Decreto-Lei 118/2013 é o documento de legislação base para Portugal, que regulamenta a eficiência energética em edifícios. Este Decreto-Lei inclui, no mesmo diploma, o Sistema de Certificação dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Antes deste Decreto-Lei entrar em vigor, era apenas o último diploma (RECS) que regulamentava ao projeto em causa.

No caso dos edifícios de serviços, os requisitos e a avaliação de desempenho têm os seguintes pilares: o comportamento térmico, a eficiência dos sistemas, a instalação, a condução e a manutenção dos sistemas técnicos.

Os requisitos de qualidade térmica não só otimizam a eficiência energética, como também os principais tipos de sistemas técnicos dos edifícios: os sistemas de climatização, a preparação de água quente sanitária, a iluminação, o aproveitamento de energias renováveis e a gestão energética. Surge então o conceito de otimização de sistemas passivos, e edifícios com necessidades quase nulas de energia. Estes conceitos suportam o padrão que deverá ser seguido a partir de 2020 e fundamentam com recomendações relativas à substituição dos sistemas de climatização em edifícios de comércio e serviços, assim como a sua manutenção.

Quanto à política da qualidade do ar interior, esta considera-se de importância acrescida, passando-se a dar mais atenção aos valores mínimos de caudal de ar novo, e as concentrações de poluentes. Privilegia-se a ventilação natural, também como forma de reduzir os custos. Eliminaram-se as auditorias de qualidade do ar interior, adotando medidas preventivas nas fontes de poluição de forma a cumprir os requisitos legais.

Introduziram-se, também, orientações fundamentadas em conhecimentos mais avançados relativos à eficiência energética e conforto térmico. No caso específico dos edifícios de serviços, o Decreto-Lei, pelo novo RECS visa melhorar o comportamento térmico, a qualidade do ar interior, estando agora definidos requisitos de qualidade térmica da envolvente nos edifícios novos e nas intervenções em edifícios existentes, nos termos do coeficiente da transmissão térmica da envolvente e do fator solar dos vãos envidraçados [32].

Relativamente a definições de nZEB, a Portaria 42/2019 é a única com informações concretas sobre tais características deste em Portugal. Segundo a Portaria, um nZEB tem que ter as condições seguintes:

- $IEE_S \leq 75\% IEE_{S,ref}$
- $R_{IEE} \leq 0,5$

Em que  $IEE_S$  corresponde ao Índice de Eficiência Energética para os consumos de tipo S (associados à climatização),  $IEE_{S,ref}$  é o mesmo índice mas para o edifício de referência estabelecido pelo RECS para comparação (em  $[kWh_{EP}/m^2 \cdot \text{ano}]$ ), e o  $R_{IEE}$  é o rácio de classe energética, ao qual está associado, de forma direta, uma etiqueta energética.

Os valores  $IEE_S$  e  $R_{IEE}$  calculam-se com as equações 2.2, 2.3 e 2.4.

$$IEE_S = \frac{1}{A_p} \sum_i (E_{S,i} * F_{pu,i}) \quad (2.2)$$

$$R_{IEE} = \frac{IEE_S - IEE_{REN}}{IEE_{S,ref}} \quad (2.3)$$

$$IEE_{REN} = \frac{1}{A_p} \sum_i (E_{REN,i} * F_{pu,i}) \quad (2.4)$$

$A_p$  corresponde à área útil em [m<sup>2</sup>],  $E_{S,i}$  é a energia consumida por um equipamento ( $i$ ) de tipo S em [kWh/ano],  $E_{REN,i}$  é a energia renovável produzida por um equipamento ( $i$ ) em [kWh/ano], e os valores de  $F_{pu,i}$  são os fatores de conversão para energia primária associados ao equipamento ( $i$ ) em [kWh<sub>EP</sub>/kWh] [24].

Por fim, importa verificar a que etiqueta energética corresponde a cada valor de  $R_{IEE}$ , tal como definido no Despacho 15793-J/2013, estando tais valores estão descritos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Classes de eficiência energética para os valores de  $R_{IEE}$  [25]

| Classe Energética | Valor de $R_{IEE}$            |
|-------------------|-------------------------------|
| A+                | $R_{IEE} \leq 0,25$           |
| A                 | $0,26 \leq R_{IEE} \leq 0,50$ |
| B                 | $0,51 \leq R_{IEE} \leq 0,75$ |
| B-                | $0,76 \leq R_{IEE} \leq 1,00$ |
| C                 | $1,01 \leq R_{IEE} \leq 1,50$ |
| D                 | $1,51 \leq R_{IEE} \leq 2,00$ |
| E                 | $2,01 \leq R_{IEE} \leq 2,50$ |
| F                 | $R_{IEE} \geq 2,51$           |

Conclui-se que, de acordo com a legislação portuguesa, um edifício pode ser nZEB se tiver a etiqueta energética "A", desde que corresponda, também, à diminuição do  $IEE_S$  de pelo menos 75% face à referência, eliminando, assim, casos em que os edifícios são pouco eficientes mas têm muita produção de energia renovável, o que baixa o valor do  $R_{IEE}$ , mas não o do  $IEE_S$ .

## 2.5 Chillers

### 2.5.1 Princípio de funcionamento

Um *chiller* é um equipamento térmico que permite, em ciclo, absorver e transferir calor de uma fonte a uma temperatura inferior para um local a temperatura superior, contrariando o sentido natural do fluxo de calor. Tal não é possível, de acordo com o enunciado de *Clausius*, mas com o contributo de uma fonte de trabalho que force esta transferência, passa a ser possível.

O conceito base do *chiller* é o ciclo frigorífico. A Figura 2.24 representa o conceito do ciclo frigorífico [26].



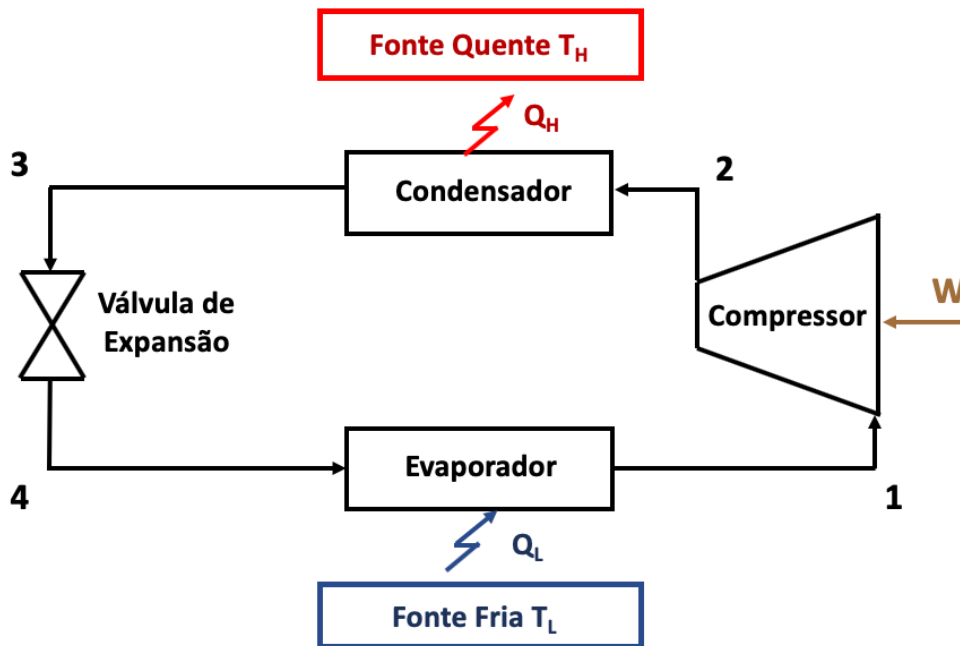


Figura 2.24: Esquema do conceito de um ciclo frigorífico de compressão de vapor. (Adaptado de [26])

A fonte quente, que se encontra à temperatura  $T_H$  é a temperatura à qual o o fluido de trabalho vai ceder calor ao exterior, no decorrer do processo de condensação (2-3). A fonte fria (que se encontra à temperatura  $T_L$ ) cede calor ao fluido de trabalho no evaporador (4-1). O trabalho necessário fornecer ao sistema ( $W$ ) é introduzido no compressor (1-2). Entre o condensador e o evaporador é necessário provocar uma redução de temperatura e pressão do fluido de trabalho, o maior possível. Para o efeito, utiliza-se uma válvula de expansão (3-4) [26].

O indicador da eficiência de um *chiller* é o *Coefficient of Performance* (COP), que é obtido através da equação 2.5, nos termos da Figura 2.24, em que  $Q_L$  é o calor recebido pela fonte fria.

$$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (2.5)$$

## 2.5.2 Absorção

Apesar do ciclo de compressão de vapor apresentar bons valores de COP, a energia necessária a fornecer ao compressor ( $W$ ) é elétrica, por isso nobre e cara. O ciclo de absorção tem três elementos iguais ao ciclo de compressão de vapor já descrito: o condensador, a válvula de expansão, e o evaporador. Difere, assim, na forma como o fluido frigorigéneo é comprimido. O compressor presente no ciclo anterior é aqui substituído por um conjunto formado por um

absorvedor, bomba, gerador e válvula, designando-se por compressor térmico, em oposição ao compressor mecânico anterior [26].

Ao comprimir-se líquido em vez de vapor é necessário um trabalho de compressão consideravelmente inferior ao ciclo de compressão de vapor, sendo por isso necessário fornecer calor ao gerador. Contudo, o calor é considerado uma fonte de energia de baixa qualidade, não sendo, assim, considerado um problema. A Figura 2.25 ilustra os componentes referenciados e como se articulam no ciclo de absorção.

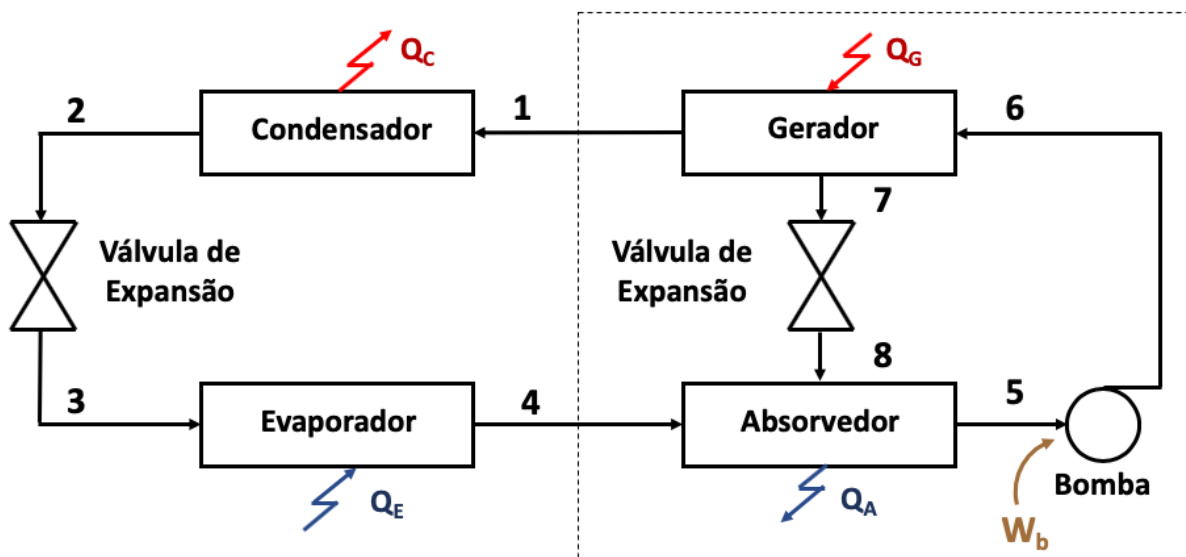


Figura 2.25: Esquema do ciclo básico de absorção. (Adaptado de [26]).

O vapor formado no evaporador é absorvido por uma solução, que foi arrefecida (7-8) no absorvedor, e, por isso, liquidifica. Sendo este processo exotérmico, liberta calor para o meio ambiente  $Q_A$  (4-5). De seguida, a solução líquida é posteriormente bombeada para o gerador. A bomba necessita de trabalho exterior ( $W_b$ ). Fornece-se calor ao gerador (6-1) para libertar o vapor do fluido frigorigéneo absorvido anteriormente, tendo, assim, a separação do vapor do refrigerante da solução, com a ajuda do fornecimento de calor [26].

O indicador da eficiência de um *chiller* de absorção é o COP, que é calculado através da equação 2.6, nos termos da Figura 2.25.

$$COP = \frac{Q_E}{Q_G} \leq \frac{T_E * (T_G - T_{amb})}{T_G * (T_{amb} - T_E)} = COP_{MAX} \quad (2.6)$$

$T_E$  corresponde à temperatura de evaporação,  $T_G$  à temperatura de geração e  $T_{amb}$  à temperatura ambiente.  $Q_E$  corresponde ao calor absorvido pelo evaporador, e  $Q_G$  ao calor requerido

para o funcionamento do gerador.

O COP ideal do ciclo de absorção é igual ao de uma máquina frigorífica de *Carnot* para as mesmas fontes [26], sendo, assim, este ciclo muito eficiente.

## 2.6 Bombas de Calor

### 2.6.1 Princípio de funcionamento

O seu princípio de funcionamento é o mesmo que uma máquina frigorífica, e baseia-se na utilização de uma fonte de calor (água, terra, ou ar), de onde se retira a energia térmica necessária para climatizar o local desejado. Para isso, são necessários dois permutadores de calor, um compressor, um evaporador, um condensador que liberte o calor, e uma válvula de expansão.

A Figura 2.26 ilustra os componentes principais das bombas de calor.

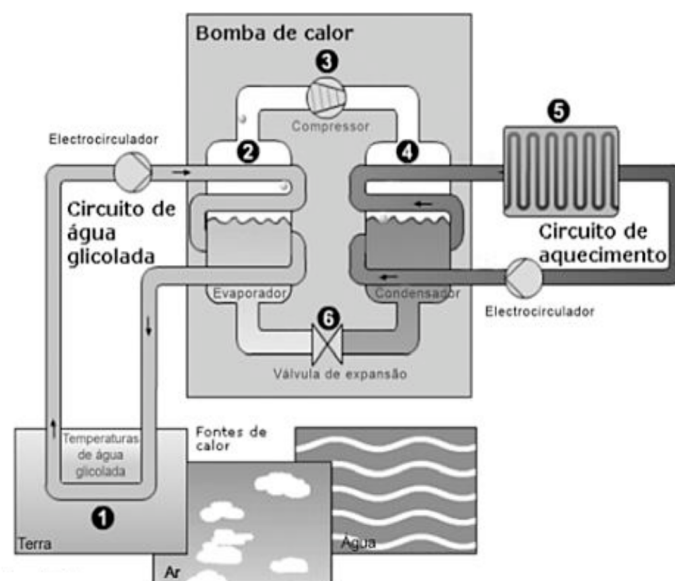


Figura 2.26: Esquema de princípio do funcionamento de uma bomba de calor (Adaptado de [www.portal-energia.com](http://www.portal-energia.com)).

Analisando a Figura 2.26, a água (ou água gliconada), transfere o calor do meio ambiente onde está inserida para o fluido frigorigéneo, através do evaporador. Posteriormente, o compressor aumenta a pressão e a temperatura do fluido frigorigéneo presente no equipamento. O condensador permite então que fluido frigorigéneo (que tem que estar a uma temperatura elevada o suficiente) liberte calor para a água, que está, neste caso, no circuito de aquecimento. O

circuito de aquecimento fornece, assim, calor ao meio, pois está a climatizá-lo. Por último, a válvula de expansão expande o fluido frigorífero, baixando a sua temperatura, para um valor suficientemente baixo, para que ocorra maior transferência de calor no evaporador. No entanto, quanto maior for a diferença de temperatura requerida no fluido frigorífero, maior é a diferença de pressão necessária, e, assim, maior a energia requerida ao compressor, logo, menor a eficiência da bomba.

O indicador da eficiência de uma bomba de calor é o COP, que é calculado a partir da equação 2.7.

$$COP = \frac{Q_{util}}{W} \quad (2.7)$$

$Q_{util}$  corresponde à energia fornecida, ou retirada do local a climatizar (dependendo se a bomba de calor está a produzir calor ou frio), e  $W$  corresponde à energia elétrica necessária para que o processo ocorra. Os valores típicos do COP de uma bomba de calor e situam-se entre 2,5 e 6.

## 2.6.2 Caracterização

Existem várias configurações de bombas de calor: ar-ar, água-ar, e água-água. A mais comum é a água-ar, mas a mais eficiente é a água-água, pois a água permite maior transferência de calor [27].

A bomba pode absorver o calor proveniente de várias fontes tais como o ar, água, ou a terra, neste caso designada como bomba de calor geotérmica. As bombas de calor geotérmicas possuem grandes vantagens ambientais, mas não são aplicáveis em todos os climas, pelo que se deve ponderar bem a escolha do tipo de bomba, assim como a sua fonte [27].

A grande vantagem da utilização de bombas de calor como fonte de energia para um edifício é que estas permitem tanto o aquecimento, como o arrefecimento, e até, em alguns casos, produção de AQS. Assim, estão geralmente associadas, a uma diminuição significativa no consumo energético pois um mesmo equipamento pode colmatar todas (ou quase todas) as necessidades térmicas do edifício [28].

Quanto aos fluidos frigoríferos, estes são classificados de acordo com as suas características termodinâmicas e físicas. São um elemento muito importante pois permitem a transferência de calor no circuito termodinâmico da bomba de calor, e as suas propriedades influenciam a eficiência da instalação.

O fluido frigorífero mais usado para este tipo de instalação é o R22. Este fluido é bastante poluente, pelo que tem surgido a necessidade de procurar alternativas. Recentemente, tem-se utilizado muito o R410A, que é uma mistura azeotrópica de dois fluidos frigoríferos: o HFC32 e o HFC125 em proporção semelhante. Este fluido assim composto possui propriedades

de transferência de calor acima da média, e superiores ao R22, e um melhor desempenho nos sistemas reversíveis de aquecimento e arrefecimento [28]. Segundo o *Standard 34* da ASHRAE, que classifica o grau de perigosidade dos fluidos frigorigéneos, o R4100A encontra-se na classe menos perigosa: A1 [29].

## 2.7 Trigeração

A trigeração, ou *combined cooling, heating and power* (CCHP) é uma tecnologia de geração de energia que deriva da cogeração (CHP), ou *combined heating and power* que combina a produção de energia elétrica e energia térmica útil. É diferente da CCHP pois também permite produzir capacidade de arrefecimento [30].

Assim tal como referido em 2.5.2, a vantagem de ter um ciclo de absorção é a economia de energia primária. Com a cogeração é possível, dependendo dos sistemas, aproveitar o calor de um motor de combustão interna, turbina de vapor, ou turbina de gás. Assim, com a introdução de um ciclo de absorção, que necessita de calor exterior para acionar o gerador, é possível obter um sistema de trigeração, produzindo água quente e água fria.

No inverno, quando não há necessidades térmicas de arrefecimento, vários sistemas de CCHP são vistos como unidades de CHP.

A Figura 2.27 representa um esquema de um sistema de trigeração típico, em que um motor de combustão interna é alimentado por um combustível. Os gases de exaustão, assim como a água usada para o seu arrefecimento (*jacket water*) são direcionados posteriormente para um recuperador de calor. O fluxo à temperatura mais elevada à saída do recuperador alimenta um *chiller* de absorção capaz de produzir frio e calor de apoio. A eletricidade é produzida através do gerador que também é alimentado pelo motor de combustão interna.

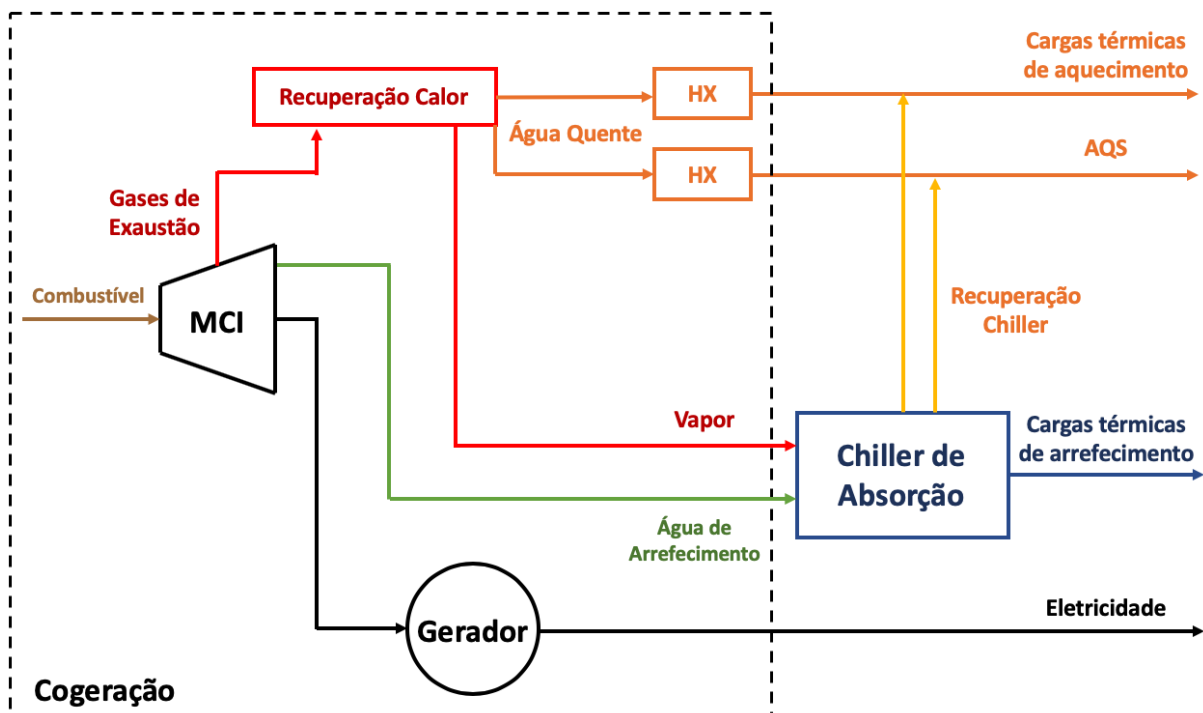


Figura 2.27: Esquema de princípio de um sistema de trieração típico.

O motor de combustão interna (MCI) liberta os gases de exaustão, e a água após o seu arrefecimento (que se encontra a uma temperatura relativamente elevada) para um recuperador de calor. Este recuperador de calor liberta a água à temperatura mais elevada (em vapor) para alimentação do *chiller* de absorção e liberta água quente para alimentar os sistemas de AQS e de aquecimento. Esta água necessita passar por um permutador de calor (HX) para trocar calor com a água de consumo, para a aquecer. O *chiller* de absorção produz água fria para o arrefecimento, e também produz água a uma temperatura mais elevada para dar suporte ao aquecimento dos fluxos de água quente. Se a água quente não estiver a uma temperatura suficientemente elevada para vencer as necessidades térmicas de aquecimento e para o AQS, é necessário colocar uma caldeira para colmatar o restante calor necessário. Este tipo de trieração é chamado de trieração simultânea [31].

O COP do *chiller* depende da temperatura da água do arrefecimento vinda do motor de combustão interna. A Figura 2.28 destaca a variação do COP do *chiller* em função da temperatura da água de arrefecimento (*cooling water*).

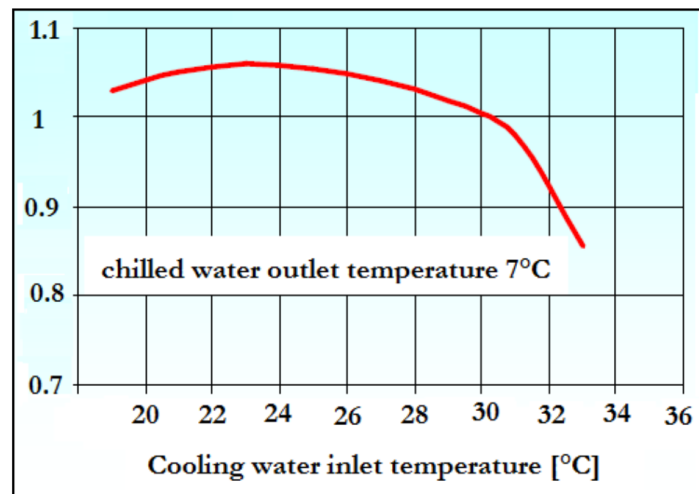


Figura 2.28: Variação do COP de um *chiller* de absorção em função da temperatura da água de arrefecimento à entrada (Modelo CH-K30, *Yazaki*)

## Capítulo 3

# Análise dos sistemas térmicos e do potencial climático

Neste capítulo apresenta-se uma descrição detalhada do estado atual do complexo Hoteleiro, a envolvente térmica escolhida para a construção. Com o objetivo de otimizar a sua certificação energética, são propostas alterações de que poderá ser alvo, bem como soluções energéticas preconizadas para para a sua central térmica.

Para tal, o edifício da Talassoterapia será descrito na sua integridade, sendo que este é o alvo de estudo central. Os sistemas técnicos abordados também serão descritos: sistema clássico com *chiller* e caldeira, sistema com bombas de calor, e sistema de trigeriação.

Após uma análise preliminar, através de simulação com as cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, será realizada uma avaliação mais detalhada que permitirá determinar o melhor sistema técnico para este edifício, para este clima.

### 3.1 Apresentação do Complexo Hoteleiro

O caso de estudo é um edifício de Talasoterapia localizado na ilha de Porto Santo, no arquipélago da Madeira. Trata-se de um complexo hoteleiro constituído de três edifícios, cada um com funções distintas, descritos de uma forma generalista:

- Edifício correspondente ao hotel de 4 estrelas composto por um piso semi-enterrado destinado aos serviços técnicos de apoio ao hotel, um piso térreo onde se encontram os serviços e espaços públicos do hotel, e os restantes pisos (1-8) onde se localizam espaços privativos dos hóspedes (1);
- Edifício de Aparthotel com 4 pisos de apartamentos (2);



- Edifício de tratamentos terapêuticos de Talassoterapia com 2 pisos. Dada a sua função, deseja-se que este edifício seja constituído por quartos, instalações de apoio, e o espaço destinado à terapia (3).

A Figura 3.1 é imagem do complexo hoteleiro obtida por satélite do complexo, estando cada edifício identificado conforme a lista anterior, e a Figura 3.2 mostra uma fotografia aérea do complexo hoteleiro, que permite ver todos os componentes. O edifício no centro deste estudo é o da Talassoterapia (3), pelo que os outros edifícios, assim como o complexo, no geral não serão analisados.



Figura 3.1: Imagem do complexo hoteleiro obtida por satélite



Figura 3.2: Fotografia aérea atual do complexo hoteleiro

### 3.1.1 Dados climáticos de referência da localização do edifício

O complexo hoteleiro encontra-se na ilha de Porto Santo, no arquipélago da Madeira. O arquipélago tem um clima muito diferente de Portugal Continental: são registadas temperaturas amenas durante a totalidade do ano, e com uma amplitude térmica muito reduzida, aproximando-se, assim, das características de um clima tropical.

A sua localização encontra-se indicada no mapa da Figura 3.3.



Figura 3.3: Mapa da localização do edifício em Estudo - Ilha de Porto Santo

As temperaturas desta zona climática são amenas e relativamente constantes ao longo do ano. Isto determina que não haja grandes necessidades de aquecimento, nem de arrefecimento. Contudo pode existir necessidades de arrefecimento, principalmente por causa da desumidificação e alguma correção de temperatura. A Figura 3.4 mostra a distribuição das temperaturas durante o ano, assim como a sua dispersão em cada mês.

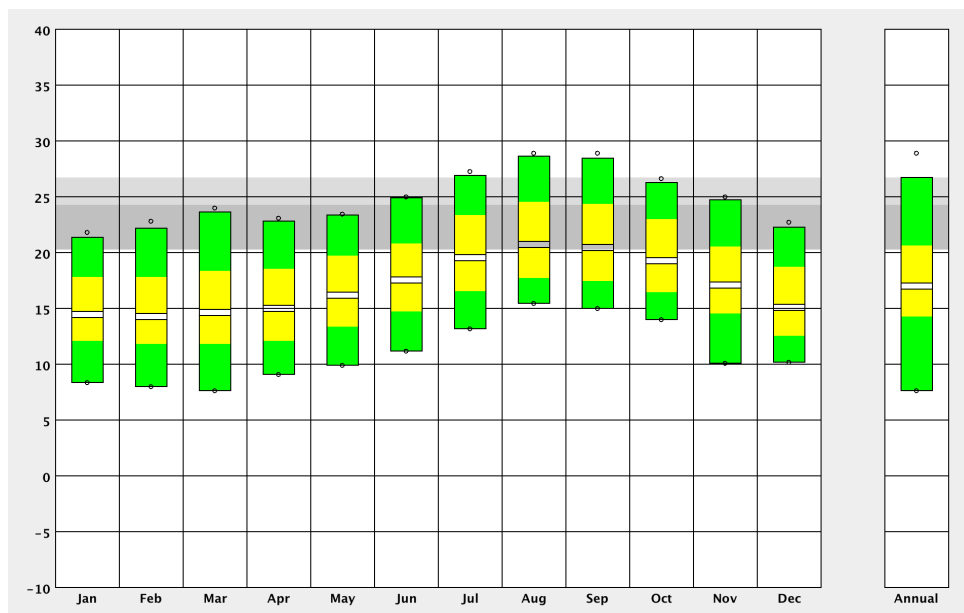


Figura 3.4: Gráfico da distribuição da dispersão das temperaturas de bolbo seco anuais em [°C] para os dados climáticos do Funchal calculados através do *Climate Consultant*

A zona cinzenta indicada na Figura 3.4 representa a zona de conforto. E é possível verificar que existem mais pontos abaixo desta zona do que acima, pelo que se pode concluir que as necessidades térmicas de aquecimento serão muito mais significativas do que as de arrefecimento.

Uma particularidade desta localização geográfica é o facto da temperatura da água do mar ser relativamente elevada e quase constante o ano todo. Por exemplo, na Figura 3.5 mostra a temperatura da água do mar em janeiro, e como é possível verificar, encontra-se a 19°C. Esta magnitude de temperaturas é muito interessante para uma possível aplicação de bombas de calor com um permutador de calor ligado à água do mar.

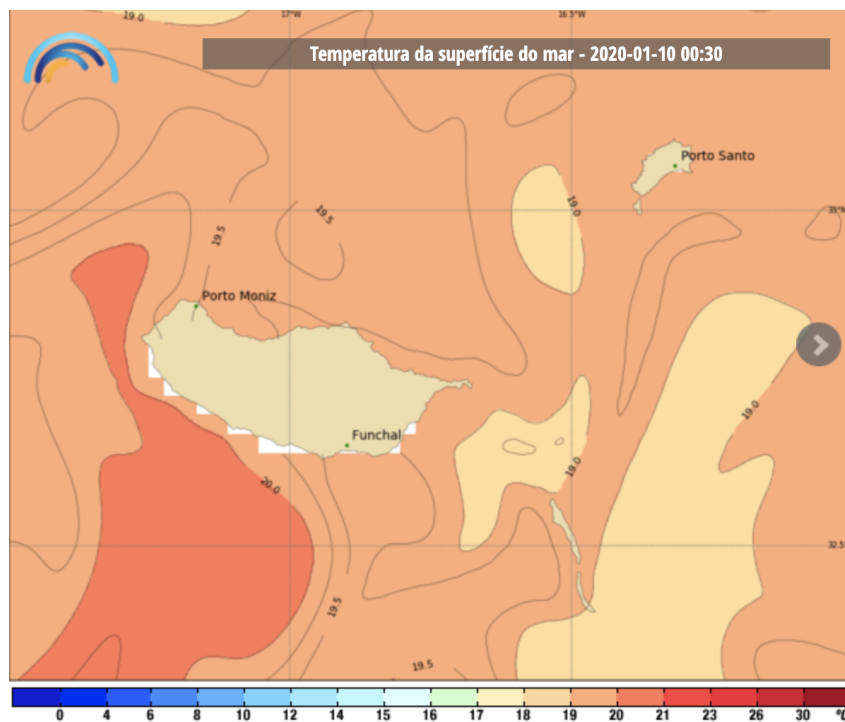


Figura 3.5: Mapa de gradiente de temperatura da superfície do mar para o dia 10-01-2020 (<https://www.ipma.pt/pt/maritima/sst/index.jsp?area=madeira>

)

De acordo com o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) e o Decreto Lei nº 118/2013 [32] Portugal continental pode ser dividido em 3 zonas climáticas de verão ( $V_1$ ,  $V_2$ , e  $V_3$ ) e 3 zonas climáticas de inverno ( $I_1$ ,  $I_2$ , e  $I_3$ ), tal como indica a Figura 3.6. O critério para determinar a que zona climática pertence uma determinada zona foi definido pelo LNEG e é determinante para o cálculo das necessidades energéticas impostas pelo RECS definido pela Portaria 17-A. Os critérios estão destacados nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1: Critérios para a determinação da zona climática de inverno [33]

| Critério | $GD \leq 1300$ | $1300 < GD \leq 1800$ | $GD > 1800$ |
|----------|----------------|-----------------------|-------------|
| Zona     | I1             | I2                    | I3          |

Tabela 3.2: Critérios para a determinação da zona climática de verão [33]

| Critério | $\theta_{ext, v} \leq 20^{\circ}\text{C}$ | $20^{\circ}\text{C} < \theta_{ext, v} \leq 22^{\circ}\text{C}$ | $\theta_{ext, v} > 22^{\circ}\text{C}$ |
|----------|---|--|--|
| Zona     | V1  | V2   | V3                                     |

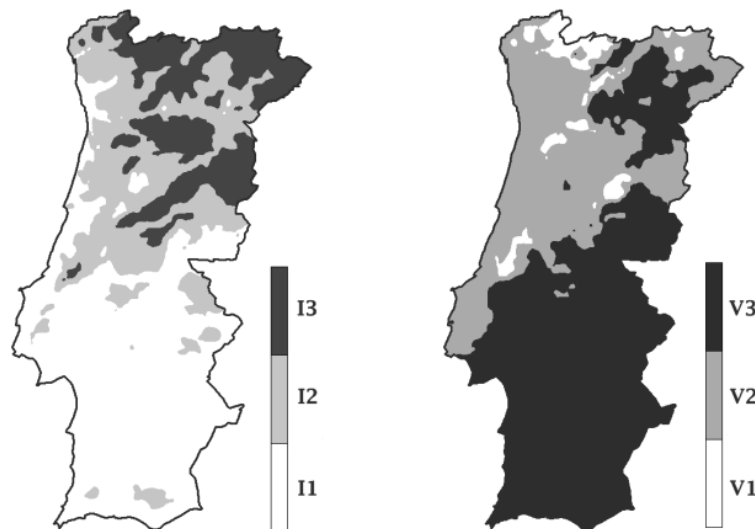


Figura 3.6: Mapa das zonas climáticas de inverno (esquerda) e verão (direita)

[33]

GD significa Graus-Dia, medida que indica o número de graus *Celcius* que é necessário aquecer nessa zona climática por dia por ano.  $\theta_{ext, v}$  significa a temperatura exterior de verão em graus *Celcius*. De acordo com as medições realizadas em Porto Santo, os dados obtidos estão descritos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Dados climáticos medidos para a localização do edifício e zonas climáticas

|  |      |
|--|------|
| Número de GD de aquecimento [°C.dias]                  | 818  |
| Temperatura exterior de inverno $\theta_{ext, i}$ [°C] | 14,8 |
| Temperatura exterior de verão $\theta_{ext, v}$ [°C]   | 20,2 |
| Zona climática de inverno                              | I1   |
| Zona climática de verão                                | V2   |

Conclui-se que o complexo se encontra numa zona climática em que tanto os invernos como os verões são suaves, como seria de prever, pela sua geolocalização, e clima ameno.

### 3.1.2 Apresentação do Edifício da Talassoterapia

O edifício da Talassoterapia é o foco principal do caso em estudo. Porque será alvo de uma intervenção grande, pode ser tratado como um edifício novo.

De acordo com o RECS, trata-se de um edifício classificado como um "Grande edifício de serviços"(GES) pois tem uma potência instalada superior a 25kW e uma área útil superior a 1000 m<sup>2</sup> [32].

É constituído por 2 pisos, sendo que um deles é térreo. A sua área útil é de 2468 m<sup>2</sup> com um pé direito médio de 2,7 m. Este edifício, por estar destinado a tratamentos terapêuticos, tem algumas particularidades: possui várias piscinas de água salgada, a diferentes temperaturas, mas também possui quartos. Em termos de manutenção, é o edifício que causa mais problemas pois a água disponível no sistema é salgada: as piscinas são de água salgada, assim como a água de circulação nas máquinas. Isto cria graves problemas de corrosão que são possíveis verificar nas Figuras 3.7, 3.8, e 3.9.



Figura 3.7: Exemplo dos efeitos da corrosão na central térmica do edifício da Talassoterapia (1/3)



Figura 3.8: Exemplo dos efeitos da corrosão na central térmica do edifício da Talassoterapia (2/3)



Figura 3.9: Exemplo dos efeitos da corrosão na central térmica do edifício da Talassoterapia (3/3)

Assim, é necessário cuidados acrescidos na seleção dos materiais para a central térmica, na garantia de ausência de infiltrações, bem como na seleção sistemas, devendo ser apenas e exclusivamente água-água. Se a água não entrar em contacto com o ar, o processo de corrosão fica substancialmente mais limitado, e tanto as máquinas, como os materiais podem durar bastante mais tempo.

### **3.1.3 Envoltiva preconizada inicialmente no projeto**

Tendo em consideração o projeto já realizado, bem como a futura modificação do edifício, a envoltiva térmica já foi escolhida, de acordo com o clima e com a Portaria 17-A. Os vários elementos construtivos exteriores encontram-se detalhados nas Tabelas [3.4](#), [3.5](#), [3.6](#), e [3.7](#).



Tabela 3.4: Constituição inicial dos materiais da Parede Exterior do edifício da Talassoterapia

| Parede Exterior         |              |                |                             |          |                           |
|-------------------------|--------------|----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Camada                  | Designação   | Espessura [mm] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | k [W/mK] | Rth [m <sup>2</sup> °C/W] |
| 1                       | Rse          | —              | —                           | —        | 0,04                      |
| 2                       | Reboco       | 20             | 2200                        | 2        | 0,01                      |
| 3                       | PEF40        | 40             | 50                          | 0,037    | 1,08                      |
| 4                       | Tijolo 11 cm | 110            | 1200                        | 0,5      | 0,22                      |
| 5                       | XPS          | 30             | 40                          | 0,037    | 0,81                      |
| 6                       | Tijolo 15 cm | 150            | 1200                        | 0,5      | 0,3                       |
| 7                       | Reboco       | 20             | 2200                        | 2        | 0,01                      |
| 8                       | Rsi          | —              | —                           | —        | 0,013                     |
| Soma                    |              | 370            | —                           | —        | 2,60                      |
| U [W/m <sup>2</sup> °C] |              | —              | —                           | —        | 0,384                     |

Tabela 3.5: Constituição inicial dos materiais do Piso Exterior do edifício da Talassoterapia

| Piso Exterior           |                     |                |                             |          |                           |
|-------------------------|---------------------|----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Camada                  | Designação          | Espessura [mm] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | k [W/mK] | Rth [m <sup>2</sup> °C/W] |
| 1                       | Rse                 | —              | —                           | —        | 0,04                      |
| 2                       | Isolamento I02 50mm | 50,8           | 43                          | 0,03     | 1,693                     |
| 3                       | Betão maciço M15    | 203,2          | 2240                        | 1,95     | 0,104                     |
| 4                       | Rsi                 | —              | —                           | —        | 0,100                     |
| Soma                    |                     | 254            | —                           | —        | 1,938                     |
| U [W/m <sup>2</sup> °C] |                     | —              | —                           | —        | 0,516                     |

Tabela 3.6: Constituição inicial dos materiais da Cobertura Exterior 1 do edifício da Talassoterapia

| Cobertura Exterior 1    |             |                |                             |          |                           |
|-------------------------|-------------|----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Camada                  | Designação  | Espessura [mm] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | k [W/mK] | Rth [m <sup>2</sup> °C/W] |
| 1                       | Rse         | —              | —                           | —        | 0,04                      |
| 2                       | Aço 7 mm    | 7              | 7850                        | 50       | 0,000                     |
| 3                       | Lã de Rocha | 100            | 175                         | 0,042    | 2,381                     |
| 4                       | Aço 7 mm    | 7              | 7850                        | 50       | 0,000                     |
| 5                       | Rsi         | —              | —                           | —        | 0,100                     |
| Soma                    |             | 114            | —                           | —        | 2,521                     |
| U [W/m <sup>2</sup> °C] |             | —              | —                           | —        | 0,420                     |

Tabela 3.7: Constituição inicial dos materiais da Cobertura Exterior 2 do edifício da Talassoterapia

| Cobertura Exterior 2    |                  |                |                             |          |                           |
|-------------------------|------------------|----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Camada                  | Designação       | Espessura [mm] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | k [W/mK] | Rth [m <sup>2</sup> °C/W] |
| 1                       | Rse              | —              | —                           | —        | 0,04                      |
| 2                       | Reboco           | 20             | 2200                        | 2        | 0,01                      |
| 3                       | Lã de Rocha      | 100            | 175                         | 0,042    | 2,381                     |
| 4                       | Betão maciço M15 | 203,2          | 2240                        | 1,95     | 0,104                     |
| 5                       | Rsi              | —              | —                           | —        | 0,100                     |
| Soma                    |                  | 323,2          | —                           | —        | 2,635                     |
| U [W/m <sup>2</sup> °C] |                  | —              | —                           | —        | 0,401                     |

Após definir elementos construtivos exteriores, é possível reconhecer que o material construtivo mais utilizado é o betão, o que vai baixar a pontuação LEED, pelo facto de não ser reciclável e ser necessário utilizar muita água na sua geração. Uma alternativa à construção em betão é a construção em argila, que apresenta valores interessantes a nível de condutibilidade térmica e resistência à compressão. Porém, as paredes necessitariam ser consideravelmente mais grossas. A nível de isolamento térmico é utilizado tanto poliestireno extrudado (XPS) e polietileno (PEF), por serem totalmente artificiais, têm impactos ambientais maiores que a lã de rocha, que, apesar de envolver ligantes que podem ser tóxicos, é produzida através de um material natural.

As paredes, tetos e pisos interiores mantêm-se como projetadas porque não interferem com os cálculos. Estas foram projetadas de acordo com as tabelas 3.8, 3.9, e 3.10.

Tabela 3.8: Constituição inicial dos materiais do Pavimento Interior do edifício da Talassoterapia

| Pavimento Interior      |                  |                |                             |          |                           |
|-------------------------|------------------|----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Camada                  | Designação       | Espessura [mm] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | k [W/mK] | Rth [m <sup>2</sup> °C/W] |
| 1                       | Betão maciço M15 | 203,2          | 2240                        | 1,95     | 0,104                     |
| Soma                    |                  | 203,2          | —                           | —        | 0,104                     |
| U [W/m <sup>2</sup> °C] |                  | —              | —                           | —        | 9,596                     |

Tabela 3.9: Constituição inicial dos materiais do Teto Interior do edifício da Talassoterapia

| Teto Interior           |                  |                |                             |          |                           |
|-------------------------|------------------|----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Camada                  | Designação       | Espessura [mm] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | k [W/mK] | Rth [m <sup>2</sup> °C/W] |
| 1                       | Betão maciço M15 | 203,2          | 2240                        | 1,95     | 0,104                     |
| Soma                    |                  | 203,2          | —                           | —        | 0,104                     |
| U [W/m <sup>2</sup> °C] |                  | —              | —                           | —        | 9,596                     |

Tabela 3.10: Constituição inicial dos materiais da Parede Interior do edifício da Talassoterapia

| Teto Interior           |              |                |                             |          |                           |
|-------------------------|--------------|----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Camada                  | Designação   | Espessura [mm] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | k [W/mK] | Rth [m <sup>2</sup> °C/W] |
| 1                       | Reboco       | 20             | 2200                        | 2        | 0,010                     |
| 2                       | Tijolo 11 mm | 110            | 1200                        | 0,5      | 0,220                     |
| 3                       | Reboco       | 20             | 2200                        | 2        | 0,010                     |
| Soma                    |              | 130            | —                           | —        | 0,240                     |
| U [W/m <sup>2</sup> °C] |              | —              | —                           | —        | 4,167                     |

### 3.1.4 Vãos Envidraçados

O edifício da Talassoterapia é composto por um total de 581.5 m<sup>2</sup> de área de envidraçados total. Existem dois tipos de vãos envidraçados: os móveis e os fixos. A composição dos vidros fixos encontra-se descrita na Tabela 3.11 e a dos vidros móveis encontra-se na Tabela 3.12.

Tabela 3.11: Composição dos vidros fixos utilizados

| Componente               | Comprimento [mm] |
|--------------------------|------------------|
| Vidro temperado exterior | 8                |
| Ar                       | 16               |
| Vidro temperado interior | 5,5              |

Tabela 3.12: Composição dos vidros móveis utilizados

| Componente               | Comprimento [mm] |
|--------------------------|------------------|
| Vidro temperado exterior | 8                |
| Ar                       | 14               |
| Vidro temperado interior | 10               |

Os vidros fixos têm um fator solar  $g_{\perp}$  de 0,75 e os vidros móveis têm um  $g_{\perp}$  de 0,34 porque têm sombreamento.

Uma vez que 54% dos vãos envidraçados do edifício são fixos, e 46% são móveis, houve a necessidade de se estudar soluções de sombriamento distintas, mas que observassem o mínimo do fator solar imposto pela legislação, atingindo o valor de 0,56.

De acordo com a Portaria 17-A [24], o valor máximo para a zona climática V2 deverá ser 0,56, por isso os vãos envidraçados estão em conformidade com a legislação em vigor.

### 3.1.5 Inércia Térmica

A inércia térmica ( $I_t$ ) de um edifício representa a capacidade de armazenamento de calor e, para um dado edifício depende da massa superficial útil de cada um dos elementos de construção, para um dado edifício. A  $I_t$  ou massa superficial útil por metro quadrado de área de pavimento é calculada recorrendo à expressão 3.1 [34]:

$$I_t = \frac{\sum_i M_{si} * S_i * r_i}{A_p} \quad (3.1)$$

Em que:

$M_{si}$  - Massa superficial do elemento  $i$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ].

$r$  - Fator de redução da massa superficial útil.

$S_i$  - Área de superfície interior do elemento  $i$  [ $\text{m}^2$ ].

$A_p$  - Área útil de pavimento [ $\text{m}^2$ ].

O valor de  $r$  que depende da resistência térmica do revestimento superficial interior e assume valores entre 0 e 1.

São definidas três classes de inércia térmica: fraca, média e forte. A cada uma destas classes corresponde um valor para a inércia térmica,  $I_t$ . A Tabela 3.13 indica os valores para cada classificação.

Tabela 3.13: Classes de inércia térmica interior,  $I_t$  [34]

| Classe de inércia térmica | $I_t$ [kg/m <sup>2</sup> ] |
|---------------------------|----------------------------|
| Fraca                     | $I_t < 150$                |
| Média                     | $150 \leq I_t \leq 400$    |
| Forte                     | $I_t > 400$                |

A inércia térmica calculada para o edifício foi de 1025,1 [kg/m<sup>2</sup>], pelo que se conclui que este edifício tem inércia térmica forte. Os elementos construtivos são constituídos por base de betão ou de tijolo, elementos com uma elevada densidade, contribuindo para o aumento da inércia térmica.

O cálculo da inércia térmica está descrito, de forma detalhada no Anexo A.

### 3.1.6 Condições de Projeto e Caracterização dos Espaços

Em termos energéticos, Hotel dispõe de um *chiller* arrefecido a ar com uma capacidade que ronda os 300 kW com um EER de 2.7, sendo relativamente baixo para os parâmetros atuais. No Aparthotel existem 4 unidades de climatização do tipo VRF com um EER de 3.15. Na Talassoterapia prevê-se instalar um *chiller* arrefecido a água com um EER de 3.2.

No que diz respeito à água quente sanitária (AQS) atual, é obtida a partir de um campo solar de coletores planos, onde existe um total de 135 coletores solares, apoiados por caldeiras de gasóleo, que já existiam tanto no hotel, como no edifício da Talassoterapia. O referido sistema suporta atualmente toda a produção de AQS do complexo. A Figura 3.10 mostra uma imagem dos coletores solares presentes no campo solar. As características técnicas dos coletores estão descritas no Anexo B.



Figura 3.10: Coletores Solares presentes no complexo hoteleiro

## 3.2 Alteração da envolvente do edifício e análise dos consumos

### 3.2.1 Caracterização dos elementos construtivos da envolvente

Apesar da envolvente do edifício se encontrar regulamentada de acordo com a Portaria 17-A, de acordo com as normas da *PassivHaus*, os valores do coeficiente de transferência de calor (U) são demasiado elevados. Para as paredes exteriores, o valor que a *PassivHaus* sugere como máximo é 0,15 [W/m<sup>2</sup>°C]. Para as coberturas e pavimentos, o valor máximo é 0,1 [W/m<sup>2</sup>°C].

Para a parede exterior foi possível baixar o valor do U para 0,139 [W/m<sup>2</sup>°C], aumentando as espessuras dos isolamentos (XPS e PEF). Foi possível, também, baixar o valor de U para 0,098 [W/m<sup>2</sup>°C] no piso exterior, com o mesmo processo.

Para os restantes elementos construtivos não foi possível chegar aos valores requeridos pela *PassivHaus*, pois implicaria uma espessura de isolamento superior a 300mm, o que pode implicar a construção. Chegaram-se a valores mais próximos do objetivo, aumentando a espessura da lã de rocha para 300mm, obtendo valores de U de 0,137 [W/m<sup>2</sup>°C] para a cobertura exterior 1, e 0,135 [W/m<sup>2</sup>°C] para a cobertura exterior 2. Os valores obtidos encontram-se descritos de forma detalhada nas tabelas 3.14, 3.15, 3.16, e 3.17.

Tabela 3.14: Constituição de acordo com a *PassivHaus* dos materiais da Parede Exterior do edifício da Talassoterapia

| Parede Exterior         |              |                |                             |          |                           |
|-------------------------|--------------|----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Camada                  | Designação   | Espessura [mm] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | k [W/mK] | Rth [m <sup>2</sup> °C/W] |
| 1                       | Rse          | —              | —                           | —        | 0,04                      |
| 2                       | Reboco       | 20             | 2200                        | 2        | 0,01                      |
| 3                       | PEF40        | 120            | 50                          | 0,037    | 3,24                      |
| 4                       | Tijolo 11 cm | 110            | 1200                        | 0,5      | 0,22                      |
| 5                       | XPS          | 120            | 40                          | 0,037    | 3,24                      |
| 6                       | Tijolo 15 cm | 150            | 1200                        | 0,5      | 0,3                       |
| 7                       | Reboco       | 20             | 2200                        | 2        | 0,01                      |
| 8                       | Rsi          | —              | —                           | —        | 0,013                     |
| Soma                    |              | 540            | —                           | —        | 7,20                      |
| U [W/m <sup>2</sup> °C] |              | —              | —                           | —        | 0,139                     |

Tabela 3.15: Constituição de acordo com a *PassivHaus* dos materiais do Piso Exterior do edifício da Talassoterapia

| Piso Exterior           |                     |                |                             |          |                           |
|-------------------------|---------------------|----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Camada                  | Designação          | Espessura [mm] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | k [W/mK] | Rth [m <sup>2</sup> °C/W] |
| 1                       | Rse                 | —              | —                           | —        | 0,04                      |
| 2                       | Isolamento I02 50mm | 300            | 43                          | 0,03     | 10,000                    |
| 3                       | Betão maciço M15    | 203,2          | 2240                        | 1,95     | 0,104                     |
| 4                       | Rsi                 | —              | —                           | —        | 0,100                     |
| Soma                    |                     | 254            | —                           | —        | 10,244                    |
| U [W/m <sup>2</sup> °C] |                     | —              | —                           | —        | 0,098                     |

Tabela 3.16: Constituição de acordo com a *PassivHaus* dos materiais da Cobertura Exterior 1 do edifício da Talassoterapia

| Cobertura Exterior 1    |             |                |                             |          |                           |
|-------------------------|-------------|----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Camada                  | Designação  | Espessura [mm] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | k [W/mK] | Rth [m <sup>2</sup> °C/W] |
| 1                       | Rse         | —              | —                           | —        | 0,04                      |
| 2                       | Aço 7 mm    | 7              | 7850                        | 50       | 0,000                     |
| 3                       | Lã de Rocha | 300            | 175                         | 0,042    | 7,143                     |
| 4                       | Aço 7 mm    | 7              | 7850                        | 50       | 0,000                     |
| 5                       | Rsi         | —              | —                           | —        | 0,100                     |
| Soma                    |             | 314            | —                           | —        | 7,283                     |
| U [W/m <sup>2</sup> °C] |             | —              | —                           | —        | 0,137                     |

Tabela 3.17: Constituição de acordo com a *PassivHaus* dos materiais da Cobertura Exterior 2 do edifício da Talassoterapia

| Cobertura Exterior 2    |                  |                |                             |          |                           |
|-------------------------|------------------|----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Camada                  | Designação       | Espessura [mm] | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | k [W/mK] | Rth [m <sup>2</sup> °C/W] |
| 1                       | Rse              | —              | —                           | —        | 0,04                      |
| 2                       | Reboco           | 20             | 2200                        | 2        | 0,01                      |
| 3                       | Lã de Rocha      | 300            | 175                         | 0,042    | 7,143                     |
| 4                       | Betão maciço M15 | 203,2          | 2240                        | 1,95     | 0,104                     |
| 5                       | Rsi              | —              | —                           | —        | 0,100                     |
| Soma                    |                  | 523,2          | —                           | —        | 7,397                     |
| U [W/m <sup>2</sup> °C] |                  | —              | —                           | —        | 0,135                     |

### 3.2.2 Análise e comparação dos consumos energéticos

Teoricamente, a mudança da constituição da envolvente permite uma alteração, de forma passiva, à eficiência energética do edifício. Desta forma, com um melhor isolamento térmico nas paredes, existem menos perdas, para o exterior no inverno, e menos ganhos solares no verão, reduzindo assim os gastos energéticos para climatização.

Porém, ao aumentar consideravelmente o isolamento térmico dos elementos construtivos, tem-se, também, menos ganhos solares provenientes do exterior, o que pode aumentar os consumos de energia.

Foi feita uma simulação no *software EnergyPlus* e obtiveram-se os resultados para os consumos energéticos para ambas as configurações (original e PH). A Tabela 3.18 mostra os resultados da contabilização dos consumos em energia final, por área climatizada, e de seguida por área total, em [kWh/m<sup>2</sup>]. Por último são, também, apresentados os valores de consumo de energia final total em [MWh]. Na última coluna da tabela é possível identificar o aumento de energia na segunda configuração em relação à primeira. A Tabela 3.19 mostra a utilização de energia para o aquecimento e arrefecimento, para cada uma das configurações, e compara os valores.

Note-se que a simulação realizada no *EnergyPlus* utilizou como sistemas energéticos base o aquecimento e arrefecimento central (*district heating/cooling*), de forma a obter apenas as necessidades térmicas.

Tabela 3.18: Consumos energéticos após a simulação no *EnergyPlus*

|  | Edifício original | Edifício PH | Variação de energia |
|--|-------------------|-------------|---------------------|
| Energia por área climatizada [kWh/m <sup>2</sup> ] | 2187,68           | 2224,68     | 1,7 %               |
| Energia por área total [kWh/m <sup>2</sup> ]       | 1761,27           | 1791,08     | 1,7 %               |
| Energia Final Total [MWh]                          | 6396,40           | 6504,59     | 1,7 %               |

Tabela 3.19: Utilização energética final [MWh] após simulação no *EnergyPlus*

|                         | Edifício original | Edifício PH | Variação de energia |
|-------------------------|-------------------|-------------|---------------------|
| <i>District Heating</i> | 5815,00           | 5969,09     | 2,65 %              |
| <i>District Cooling</i> | 218,20            | 172,30      | -21,04 %            |

Nos consumos energéticos gerais, verifica-se um aumento para a configuração PH em relação à original. Esta alteração poderá resultar da diminuição de ganhos solares, como consequência do aumento do isolamento térmico, bem como da implementação dos envidraçados eficientes. Esta alteração torna-se mais evidente aquando da análise da Tabela 3.19, onde se



observa uma diminuição significativa (21,04%) dos consumos de arrefecimento. Isto significa que no verão há menos ganhos solares, o que diminui consideravelmente a temperatura dos espaços, diminuindo, também, as necessidades térmicas de arrefecimento. Há ainda um aumento na utilização de energia para o aquecimento, provocado pela mesma causa.

Conclui-se que uma configuração teoricamente mais eficiente, do ponto de vista energético, como a PH não é viável para um local com o clima de Porto Santo, uma vez que as temperaturas são amenas, e há uma perda de ganhos solares que existem no inverno - o oposto do que ocorre nos países da Europa central e nórdicos, onde este tipo de configuração é implementada de uma forma mais rigorosa.

Assim, as configurações que cumprem a Portaria 17-A são suficientes e as mais indicadas para esta zona térmica. A configuração original foi a utilizada para o seguimento do trabalho.

## Capítulo 4

# Elaboração e aplicação dos modelos de simulação dos diferentes sistemas

Neste capítulo são analisados os diferentes modelos de simulação utilizados. Numa primeira fase foi realizada uma análise preliminar estática em Excel através dos dados obtidos no modelo de simulação em *EnergyPlus* para poder ter noções do comportamento dos equipamentos, para depois efetuar a simulação transiente no *software* TRNSYS, e poder comparar os erros que uma simulação em regime permanente faz, em relação ao regime transiente.

O edifício foi abordado com uma composição em 3 partes: o hotel, as piscinas, e a central térmica. A central térmica permite dar resposta às necessidades térmicas requeridas pelas outras duas partes e foi idealizada pelos projetistas, assim como as possíveis soluções alternativas. Esta central térmica produz ar tratado para o hotel e para as piscinas, assim como água quente para a reposição da piscina, os permutadores de aquecimento do hotel, e o AQS, e água fria para os permutadores de arrefecimento do hotel.

Para responder às necessidades térmicas do hotel existe, portanto, um sistema ar-água que utiliza permutadores de calor (de calor e frio). A ventilação é assegurada por unidades de tratamento de ar. Assim, as centrais térmicas preconizadas apenas diferem na fonte de calor e frio para cada um dos subsistemas. Para realizar o tratamento do ar das piscinas e dos espaços, assim como o aquecimento e arrefecimento dos espaços, recorre-se ao uso de permutadores de calor *heating coils* e *cooling coils*, respetivamente, que são denominados de baterias de quente e frio para melhor compreensão.

### 4.1 Análise energética estática preliminar

Antes de elaborar a análise no *software* TRNSYS, foi realizado um estudo preliminar no Excel com os dados do *EnergyPlus*, para analisar as necessidades térmicas de aquecimento,

arrefecimento e, assim, determinar as potências dos equipamentos a utilizar para este efeito, assim como das bombas hidráulicas e sistemas de ventilação.

Existem vários tipos de espaços e necessidades térmicas correspondentes. Os espaços comuns, como os quartos, os gabinetes, casas de banho, etc... são considerados espaços a climatizar através de ventiloconvectores. Estes espaços estão definidos, em termos energéticos, por uma carga térmica de aquecimento e uma carga térmica de arrefecimento.

Existe ainda, o espaço das piscinas, a climatizar através de uma Unidade de Tratamento de Ar (UTA), onde o maior desafio é combater a carga latente, pois, devido à elevada taxa de evaporação que ocorre nas piscinas, a humidade do ar é muito elevada. Assim, em termos energéticos, este espaço é caracterizado por uma carga térmica sensível e uma carga térmica latente.

No que diz respeito ao tratamento térmico da água, doce e salgada, foi considerada a água para as piscinas e a água para o serviço de Águas Quentes Sanitárias (AQS). Para a água das piscinas, foi dada uma potência de aquecimento, que corresponde às perdas de evaporação das piscinas, assim como a compensação da água. Para o AQS foi calculado um valor do consumo de água diário, multiplicado pela ocupação do hotel no ano, e pela sua utilização horária, de forma a obter obter o caudal de consumo.

Os dados foram obtidos através da simulação térmica previamente realizada no *software EnergyPlus*, como se pode ver a modelação edifício utilizada no *software Sketchup*. As Figuras 4.1, 4.2, e 4.3 mostram imagens do *software* de modelação onde se podem observar os vários elementos construtivos do edifício da Talassoterapia.

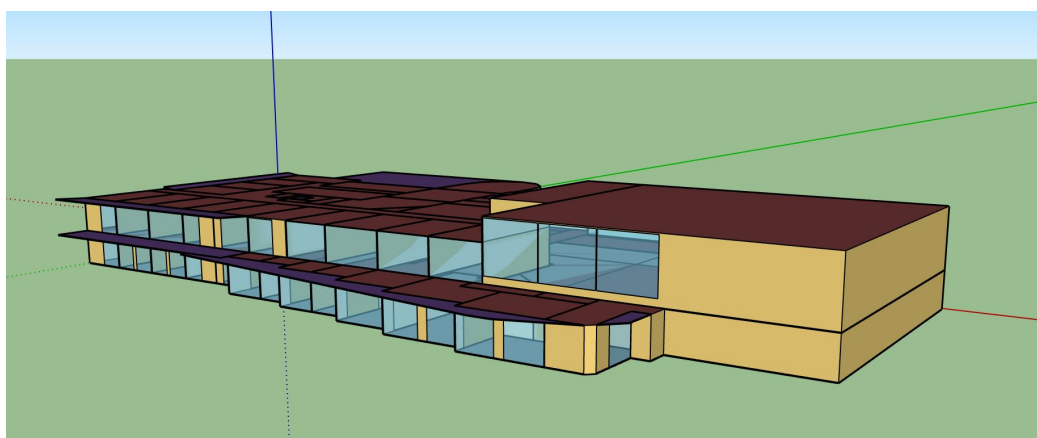


Figura 4.1: Imagem da modelação do edifício da Talassoterapia no *Sketchup*. (1/3)

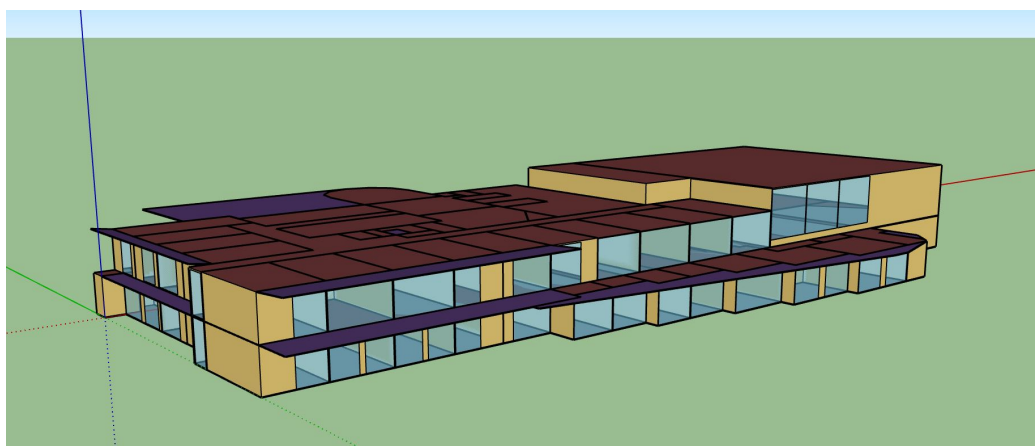


Figura 4.2: Imagem da modelação do edifício da Talassoterapia no *Sketchup*. (2/3)

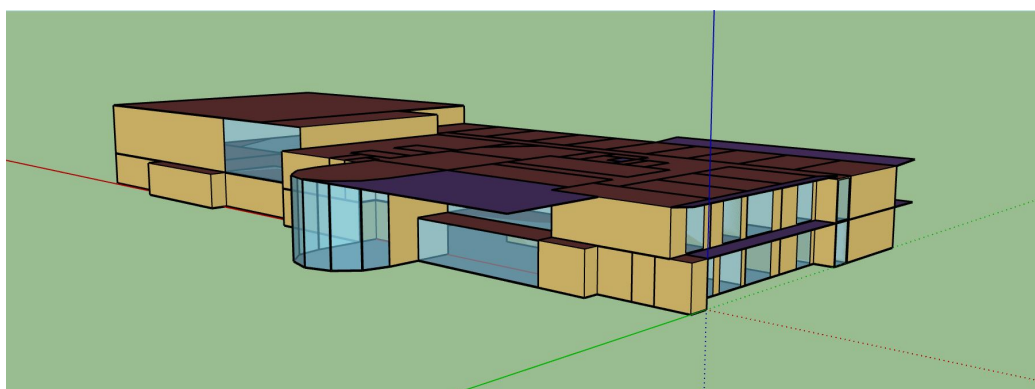


Figura 4.3: Imagem da modelação do edifício da Talassoterapia no *Sketchup*. (3/3)

Nestas representações, os elementos opacos aparecem a amarelo, as coberturas aparecem a castanho, os elementos de sombreamento aparecem a roxo e os vãos envidraçados a azul claro.

Após a simulação realizada pelo *EnergyPlus*, foram retiradas as necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento para cada zona individual, e depois agrupadas, para retirar as necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento para a totalidade das zonas. Através deste *software* também foi possível analisar os consumos horários do edifício, assim como determinar o consumo e a potência para o aquecimento e arrefecimento, e equipamentos elétricos, iluminação, etc...

#### 4.1.1 Necessidades Térmicas Sensíveis de Aquecimento e Arrefecimento

Assim como referido anteriormente, os consumos horários foram determinados através da função *Ideal Loads* do *EnergyPlus*. Cada zona definida no projeto tem cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, para cada hora do ano, e como neste projeto considerou-se o edifício

como um todo, apenas separando a zona das piscinas do restante edifício, tem-se apenas uma zona. As Figuras 4.4 e 4.5 e mostram a dispersão das necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento das zonas do edifício da Talassoterapia.

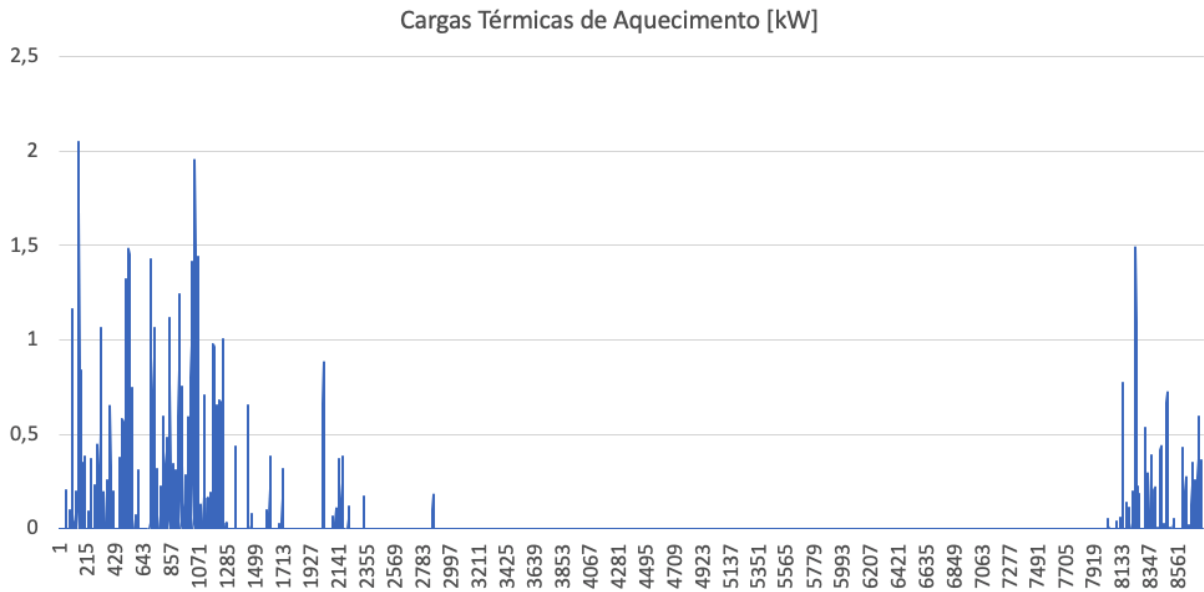


Figura 4.4: Distribuição anual das cargas térmicas de aquecimento, por hora.

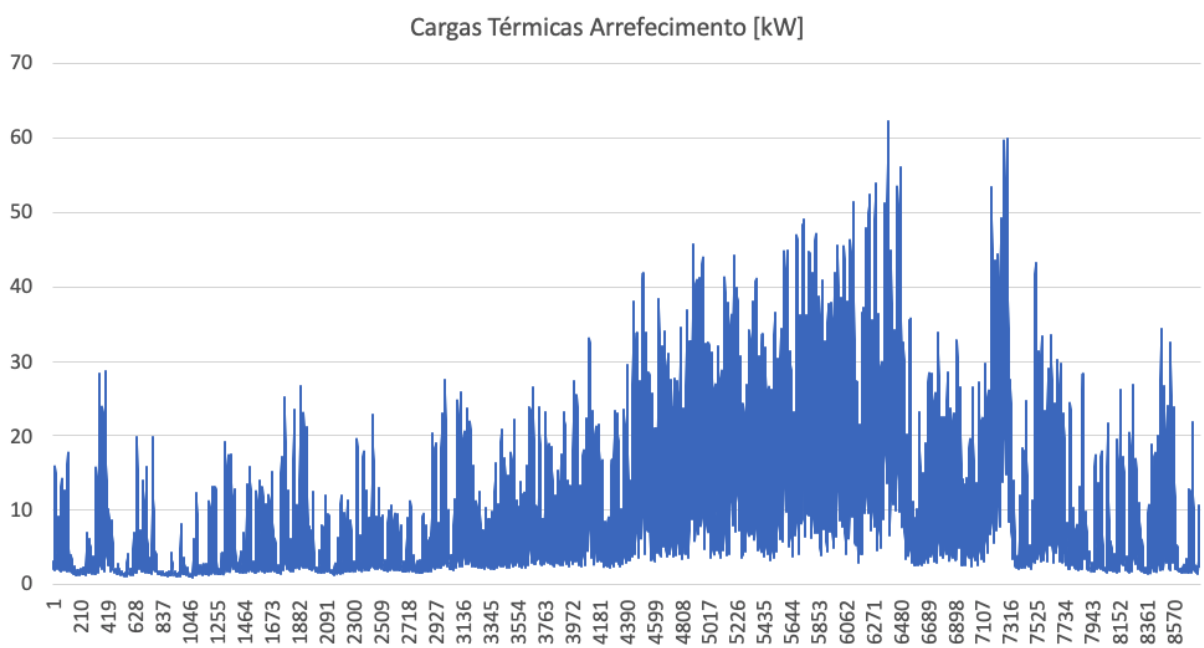


Figura 4.5: Distribuição anual das cargas térmicas de arrefecimento, por hora.

É possível identificar, durante um ano inteiro, uma necessidade muito maior de arrefecimento do que aquecimento. As maiores necessidades de aquecimento foram identificadas nas primeiras e últimas horas do ano (que correspondem ao inverno), assim como seria de esperar, mas o seu valor não ultrapassa os 2 kW. Porém, aquando da análise das necessidades de arrefecimento verificou-se que ocorrem durante o ano inteiro, chegando mesmo durante mesmo o período do verão, a atingir cerca de 60 kW - valor bastante significativo quando comparado com os valores das necessidades de aquecimento.

Esta diferença poderá ser explicada pela grande percentagem de superfície envidraçada, que face a um clima ameno e não havendo muitas perdas de calor para o exterior, resulta em maiores ganhos solares por radiação.

#### 4.1.2 Consumos da Zona das Piscinas

Relativamente às piscinas, estas foram tratadas como uma só zona, apesar de no *EnergyPlus*, e no projeto real, existirem 3 piscinas interiores. Cada uma das piscinas tem uma temperatura diferente, e neste caso assumiu-se uma média ponderada das temperaturas da água. Como nesta zona existe uma grande quantidade de perdas por evaporação, a carga latente é mais importante que a carga sensível. A Figura 4.6 mostra uma relação direta entre as necessidades sensíveis e latentes das piscinas.

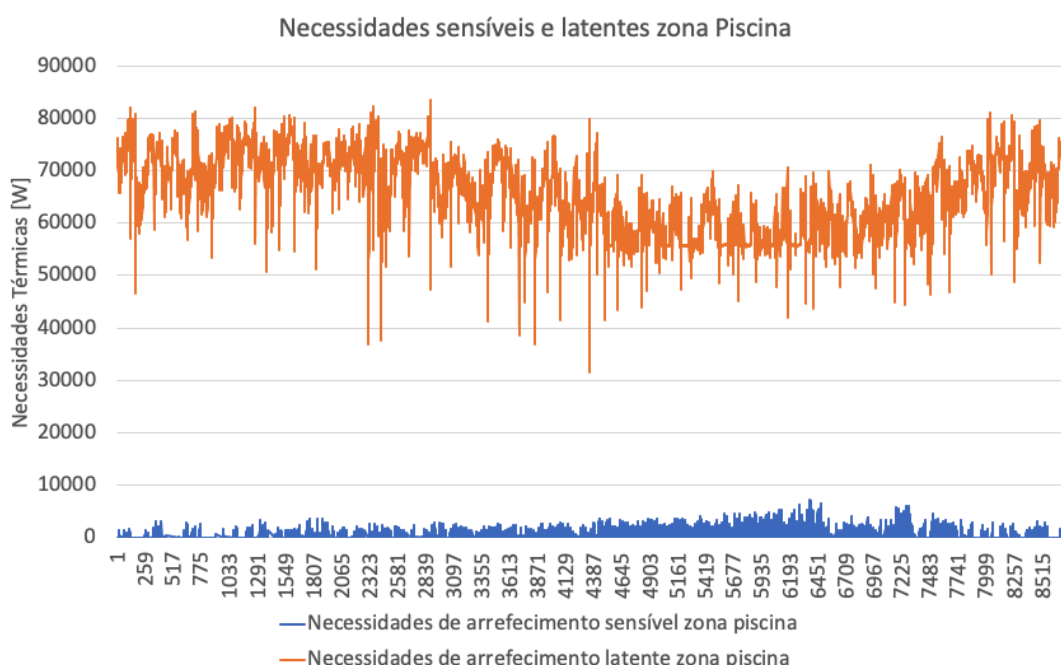


Figura 4.6: Distribuição das necessidades de arrefecimento sensível e latente da piscina, por hora.

Mediante a observação da Figura 4.6, confirma-se que a carga latente é muito superior à carga sensível de arrefecimento na zona das piscinas, como preconizado. Assim, o tratamento de ar na zona das piscinas deverá ter tal fator em consideração.

De forma a dimensionar a UTA para o tratamento do ar da zona das piscinas, determinaram-se as condições de insuflação, consoante a carga térmica latente, desprezando a carga térmica sensível. Este processo encontra-se detalhado na secção 4.2.1.

As necessidades térmicas latentes proveem das elevadas taxas de evaporação que ocorrem nas três piscinas existentes no complexo. A Figura 4.7 ilustra a evolução das perdas evaporativas ao longo do ano para cada piscina

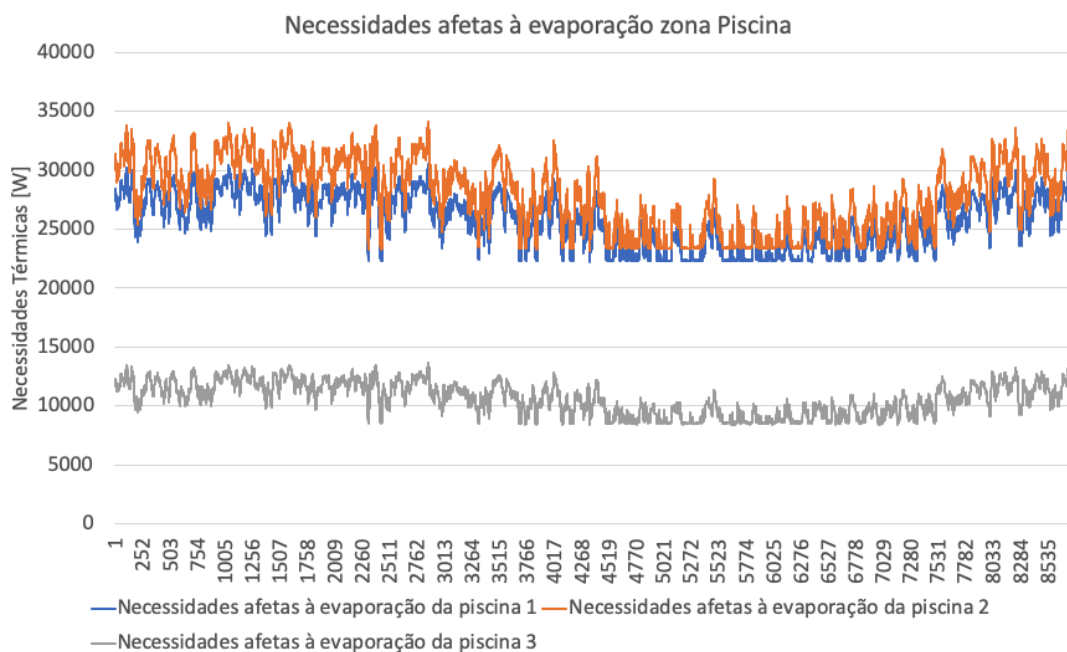


Figura 4.7: Distribuição das perdas de calor por evaporação anuais em cada piscina, por hora.

Estas perdas têm que ser compensadas, tanto a nível térmico como a nível mássico, por um sistema de aquecimento de água. Quando existem perdas por evaporação, a água da piscina perde energia, e, conseqüentemente, baixa a sua temperatura, pelo que é necessário repor essa energia.

A Figura 4.8 mostra as necessidades térmicas de aquecimento das águas das piscinas, que compreendem a compensação mássica e energética da evaporação.

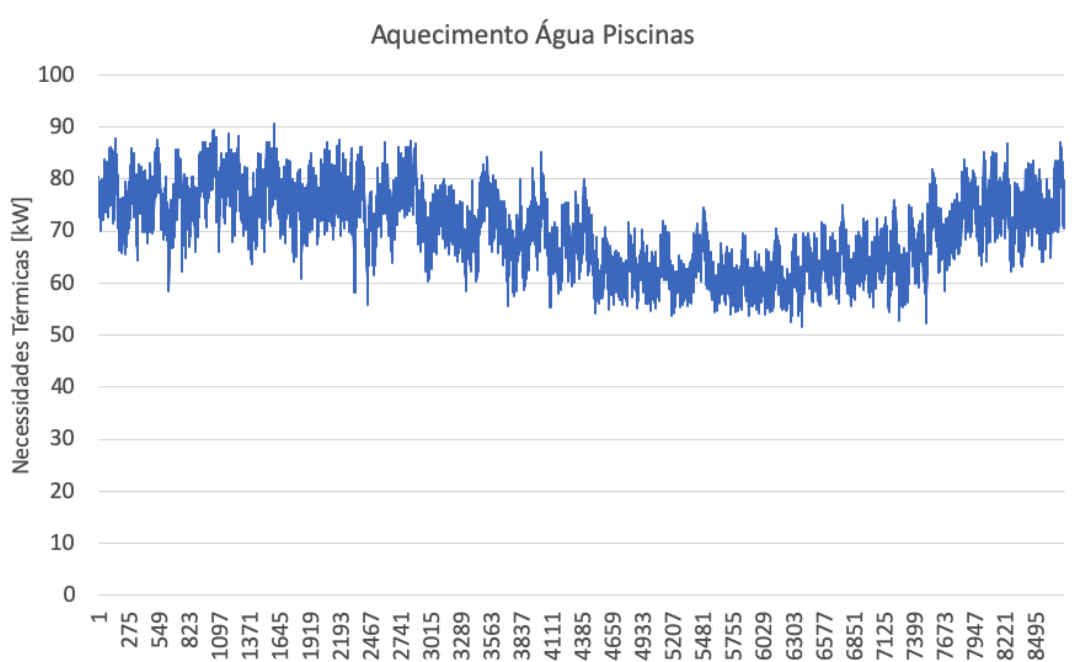


Figura 4.8: Distribuição das necessidades de aquecimento da água das piscinas, por hora.

Tal como se observa na Figura 4.8 é necessário fornecer energia para as piscinas entre os 60 e os 90 kWh, o que deve ser assegurado por um equipamento como uma caldeira, auxiliado por um sistema solar térmico.

### 4.1.3 Consumo de AQS

Em relação ao AQS, e de acordo com a ASHRAE para hotéis de 4 estrelas, o consumo diário de AQS é de 70 l/cama [29]. Porém, como este hotel tem piscinas e se encontra perto da praia foi feita uma correção e passou a ser considerado o valor de 100 l/cama. Para os banhos da Talassoterapia, os valores dos consumos dos banhos, assim como o número de banhos realizados por dia foram retirados das medidas dos consumos realizadas no local. Assim, aferiu-se que cada pessoa, num ciclo consumia 40 l de água. Para calcular o caudal nominal de AQS para o consumo da Talassoterapia, o edifício foi dividido em duas partes: os quartos e os banhos:

Para os quartos:

|   |        |
|---|--------|
| Consumo de água em cada quarto por pessoa : | 100 l  |
| Número de quartos :                         | 20     |
| Número de pessoas por quarto :              | 2      |
| Consumo total de água para os quartos :     | 4000 l |

Para os banhos:



|   |        |
|---|--------|
| Consumo de água em cada ciclo por pessoa por banho: | 40 l   |
| Número de ciclos diários:                           | 4      |
| Número de pessoas por ciclo:                        | 10     |
| Consumo total de AQS para os banhos:                | 1600 l |

O caudal nominal para o consumo de AQS para o edifício da Talassoterapia é, portanto 5600 l por dia. Para se obter o caudal horário de consumo, foi considerado um fator de utilização que se encontra descrito no Anexo C, assim como o fator de ocupação do hotel, medido localmente. O hotel apresenta uma taxa de ocupação perto dos 100 % na altura do verão mas no inverno os valores são substancialmente menores, pelo que seria um erro grosseiro considerar o consumo de AQS sempre nominal para o ano inteiro.

## 4.2 Simulação no *software* TRNSYS para um sistema clássico (Caldeira+Chiller)

Foi elaborado um modelo de simulação do sistema de climatização instalado no edifício, tendo sido usado para o efeito o programa de simulação TRNSYS . Este sistema de climatização é composto por um *chiller* elétrico, uma caldeira, uma unidade de tratamento de ar (UTA) e o sistema de controlo. Para além disso, foi ainda integrado um sistema de painéis solares térmicos para contribuir para o aquecimento das águas sanitárias e águas das piscinas.

O *software* TRNSYS permite colocar os elementos correspondentes aos equipamentos, que representam rotinas, ou algoritmos matemáticos já instalados no programa, designadas *proformas*, onde o utilizador apenas programa alguns parâmetros e as ligações entre cada uma das rotinas. Cada *proforma* corresponde a um *Type* com um número associado. Existem, ainda, os módulos de equações que não são nenhum *Type* e que permitem fazer inúmeras operações sobre as variáveis que estão a ser simuladas (variáveis de controlo, multiplicações, etc...), e podem ser introduzidos vários módulos de equações na simulação. No final da montagem de um sistema de simulação, o aspeto final no *Simulation Studio*, que é a interface de montagem de componentes, é o apresentado na Figura 4.9.

Este software permite obter os resultados de uma forma clássica e gráfica (Figura 4.10), conseguindo-se observar em tempo real os resultados das diferentes grandezas para um melhor controlo e ajuste do modelo.

Avaliação de Soluções de Climatização aplicadas na Hotelaria para atingir a classificação nZEB

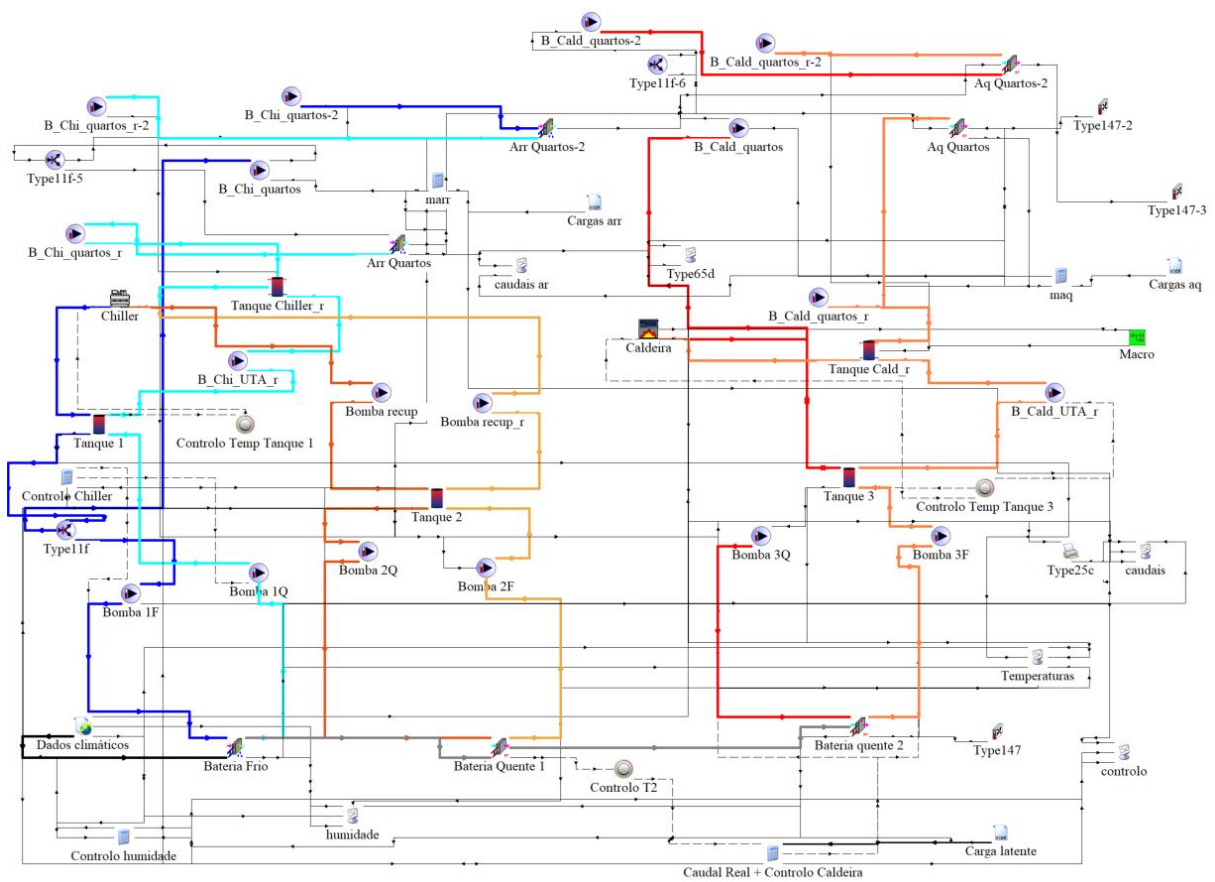


Figura 4.9: Montagem da simulação do sistema clássico na interface do *Simulation Studio*

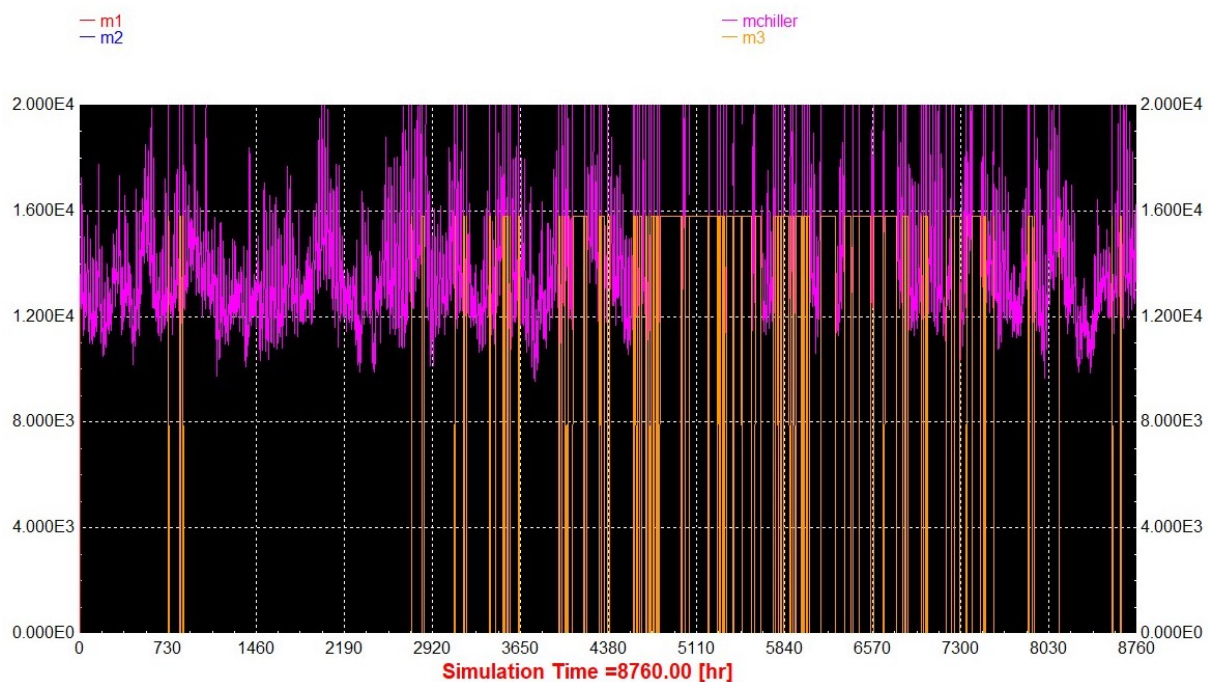


Figura 4.10: Exemplo de um gráfico de resultado de simulação no TRNSYS (Caudal de ar que passa na UTA das piscinas)

Para simplificar o processo, a simulação foi dividida em várias partes. Numa primeira etapa foi simulada a unidade de tratamento de ar das piscinas, pois é o componente que necessita maior detalhe físico e termodinâmico. De seguida, os restantes componentes do projeto foram adicionados. Nas próximas secções os elementos simulados serão representados sob forma de esquema porque as imagens do TRNSYS não são claras, como é possível verificar na Figura 4.9.

#### 4.2.1 Modelo de simulação da UTA das Piscinas

A UTA utilizada na piscina é constituída por uma bateria de frio e duas baterias de quente. A bateria de frio permite o arrefecimento e desumidificação do ar, cuja água fria é produzida no *chiller*, a primeira bateria de quente permite aquecer em parte, ou na totalidade o ar já desumidificado. Esta bateria é alimentada pela recuperação do *chiller*, podendo dissipar e utilizar o calor retirado no primeiro permutador do *chiller*, porém pode não ser suficiente para aquecer o ar até à temperatura desejada, motivo pelo qual surge a segunda bateria quente, alimentada pela caldeira. Para um melhor controlo foram utilizados tanques de inércia para a água fria e quente provenientes do *chiller* e da caldeira, respetivamente. Foram utilizadas bombas de

caudal variável que permitem o controlo do caudal de água dos circuitos de climatização. O sistema de controlo será apresentado mais à frente. A Figura 4.11 permite esquematizar, de forma simplificada, o funcionamento da UTA das piscinas, assim como as suas partes intervenientes.

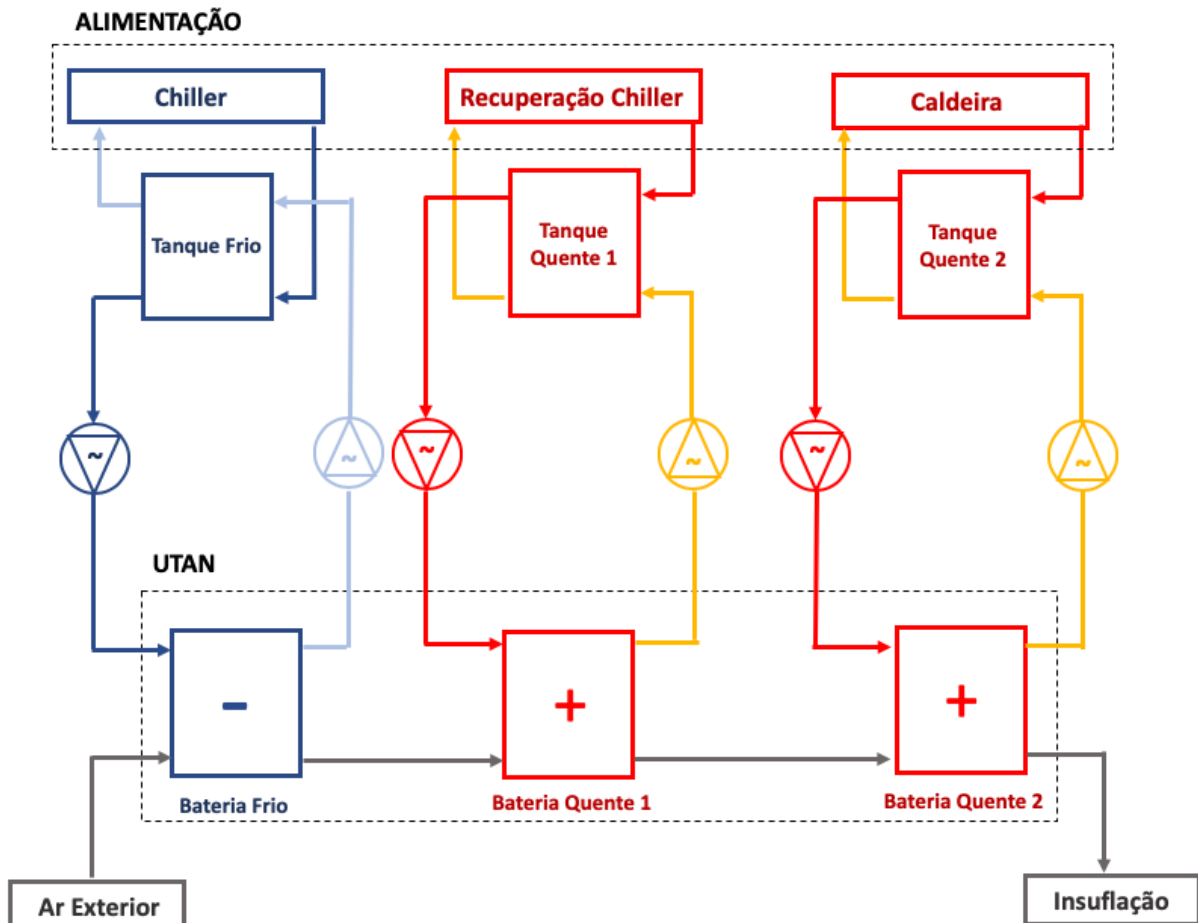


Figura 4.11: Esquema do conceito da UTA das piscinas, e dos sistemas da sua alimentação.

Numa fase inicial foi elaborada uma análise detalhada dos fenómenos físicos e termodinâmicos envolvidos no processo de evaporação existente na zona das piscinas. No sentido de facilitar a sua análise optou-se por admitir uma temperatura uniforme em todas as piscinas interiores e igual a 34,6°C

Para condições de projeto, foram definidos valores de temperatura e humidade constantes do ar envolvente da piscina de 35°C e 14 g/kg<sub>ar</sub> de humidade absoluta. Estas condições representam o *setpoint* definido para a sala, representando o conforto dos utilizadores.

Assim, com os dados climáticos horários, e as necessidades térmicas da zona das piscinas, foi possível determinar quais seriam as condições de insuflação do ar na zona das piscinas. Como a carga térmica latente representa a energia ganha através de um processo isotérmico,

com aumento de humidade, é possível determinar a humidade das condições de insuflação através da expressão 4.1 da ASHRAE [29].

$$Q_L = 3010 * \dot{V} * (w_{\text{setpoint}} - w_{\text{insuflação}}) \quad (4.1)$$

Sabendo a humidade absoluta do ponto *setpoint*, e o caudal de ar nominal, que de acordo com o projeto é igual a 25000 [m<sup>3</sup>/h], calculou-se o valor de  $w_{\text{setpoint}}$  em [g/kg<sub>ar seco</sub>] (expressão 4.2).

$$w_{\text{insuflação}} = w_{\text{setpoint}} - \frac{Q_L * 1000 * 3.6}{3010 * \dot{V}} \quad (4.2)$$

Calculou-se a diferença entre a humidade exterior e a humidade de insuflação, para determinar a desumidificação necessária pela parte da UTA (expressão 4.3).

$$\Delta w = w_{\text{exterior}} - w_{\text{insuflação}} \quad (4.3)$$

Quando  $\delta w$  é positivo, significa então que é necessário desumidificar, se for negativo então a humidade exterior é inferior à humidade de insuflação, o que implicaria uma humidificação. Porém, não faz sentido humidificar o ar antes de entrar na zona da piscina, que é naturalmente húmida dada a enorme taxa de evaporação. A solução passa, então, por diminuir o caudal de insuflação em relação ao caudal nominal. A Figura 4.12 sumariza os processos que foram referidos e permite esquematizar as variáveis em questão.

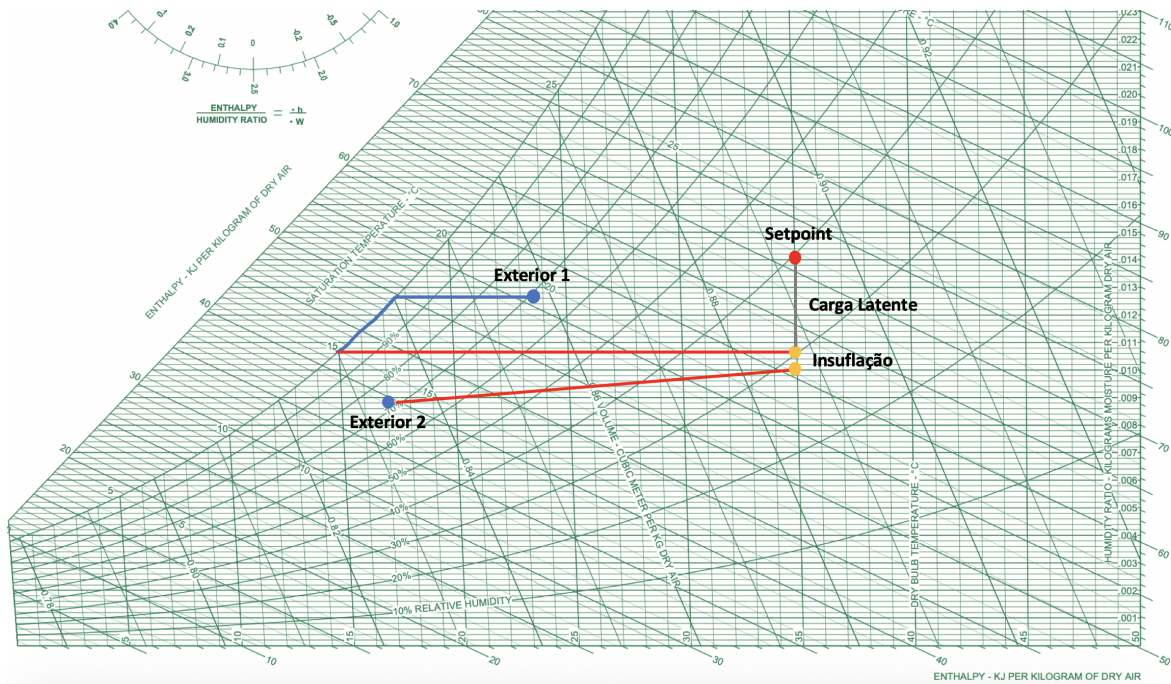


Figura 4.12: Esquema das duas condições-tipo de entrada, e processos termodinâmicos realizados pela UTA das piscinas num diagrama psicrométrico.

Existem duas condições-tipo do ar à entrada, representadas na Figura 4.12 (Exterior 1 e Exterior 2). Para as condições exteriores do tipo 1 (Exterior 1) é necessário acionar o *chiller* para arrefecimento e desumidificação e parte, ou totalidade, do aquecimento, e caso não seja suficiente para o aquecimento até às condições de insuflação, é necessário acionar a caldeira, para aquecer até ao ponto necessário. Para as condições exteriores do tipo 2 (Exterior 2), a humidade exterior é inferior à humidade de insuflação, pelo que apenas é necessário aquecer, havendo um ajuste de caudal para atingir a humidade de insuflação desejada. Assim, ativa-se apenas a caldeira.

As condições de insuflação variam consoante a carga térmica latente necessária para essa hora, dado a variabilidade da carga térmica associada às condições exteriores.

O caudal de ar novo a insuflar, nas condições do tipo 2 (Exterior 2), de forma a não ser necessário humidificar o ar, foi obtido pela expressão 4.4. Note-se que apenas se transfere calor de forma sensível, o permitido pelas baterias de quente.

$$Q_{real} = \dot{m}_{real} * c_p * \Delta T = \dot{m}_{real} * c_p * (T_{insuflação} - T_{exterior}) \quad (4.4)$$

O valor de  $Q_{real}$  é igual à carga latente  $Q_L$ , assumindo que os permutadores de calor têm uma rendimento de 100 %, o que é aceitável. A variável  $c_p$  é correspondente ao calor específico a pressão constante do fluido em questão, que neste caso é o ar, e é igual a 1005 [J/(kg.K)].

Assim, obtém-se o caudal mássico de ar necessário para atingir as condições de insuflação. Para ter os novos valores do caudal volúmico apenas é necessário fazer uma conversão.

$$\dot{V}_{\text{real}} = \frac{\dot{m}_{\text{real}}}{\rho_{\text{ar}}} \quad (4.5)$$

Estando as variáveis definidas, é possível elaborar o modelo de simulação no TRNSYS. O sistema, assim como foi descrito, foi implementado no *software*, sendo apenas necessário definir as variáveis de controlo, que estão descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Variáveis de controlo necessárias à modelização da UTA

| Variável                | Descrição  | Formulação  |
|-------------------------|--|---|
| $\dot{m}_{\text{real}}$ | Caudal de ar realmente em circulação               | $\frac{q_{\text{latente}}}{1,005 \cdot (35 - T_{\text{ext}})}$                    |
| CC                      | Variável de controlo do <i>chiller</i>             | 1 se $\omega_{\text{ext}} \geq \omega_3$<br>0 se $\omega_{\text{ext}} < \omega_3$ |
| CV                      | Variável de controlo do caudal de ar               | 1 se CC = 1<br>$\frac{\dot{m}_{\text{real}}}{8,347222}$ se CC = 0                 |
| CT <sub>2</sub>         | Variável de controlo da primeira bateria de quente | 1 se $T_2 < 35^\circ\text{C}$<br>0 se $T_2 \geq 35^\circ\text{C}$                 |

A variável CT<sub>2</sub> controla a temperatura da primeira bateria de quente, e com isso controla o funcionamento das bombas de circulação que fornecem água quente para a segunda bateria de quente. Não pode exercer controlo diretamente sobre a caldeira, porque esta fornece calor para o AQS e para os espaços.

Os vários componentes utilizados no TRNSYS encontram-se listados no Anexo D.1.

Os componentes que não foram referidos são as equações (com um ícone de equação), e os componentes que têm os dados que foram calculados à parte.

As características do *chiller* presente nesta componente da simulação estão descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Características do *chiller* utilizado na simulação clássica

| Componente                            | Descrição   |
|---------------------------------------|-------------|
| Potência Nominal                      | 700 [kW]    |
| Caudal nominal de água fria           | 32700 [l/h] |
| Caudal nominal de água de recuperação | 35940 [l/h] |

As características da caldeira presente nesta componente da simulação estão caracterizadas na Tabela 4.3. Note-se que o *chiller* e a caldeira alimentam, também, as outras componentes

da simulação, mas a descrição apresentada é a dos equipamentos capazes de fornecer o sistema inteiro, pelo que serão apenas descritas nesta secção.

Tabela 4.3: Características da caldeira utilizada na simulação clássica

| Componente                     | Descrição    |
|--------------------------------|--------------|
| Potência nominal               | 500 [kW]     |
| Caudal nominal                 | 71280 [kg/h] |
| Temperatura de <i>setpoint</i> | 90 [°C]      |
| Rendimento Térmico $\eta$      | 0,9          |
| Rendimento da Combustão        | 0,9          |

As características das bombas que alimentam o circuito de arrefecimento (azul na Figura 4.11) encontram-se na Tabela 4.4. As características das bombas que alimentam o circuito de recuperação (provenientes da recuperação do *chiller*) estão descritas na Tabela 4.5, e as características das bombas que alimentam o circuito proveniente da caldeira encontram-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.4: Características das bombas de circulação de frio utilizadas na UTA na simulação clássica

| Componente              | Descrição    |
|-------------------------|--------------|
| Potência nominal        | 1,5 [kW]     |
| Caudal nominal          | 15800 [kg/h] |
| Rendimento Geral $\eta$ | 100 %        |

Tabela 4.5: Características das bombas de circulação de recuperação utilizadas na UTA na simulação clássica

| Componente              | Descrição    |
|-------------------------|--------------|
| Potência nominal        | 1,5 [kW]     |
| Caudal nominal          | 35940 [kg/h] |
| Rendimento Geral $\eta$ | 100 %        |



Tabela 4.6: Características das bombas de circulação da caldeira utilizadas na UTA na simulação clássica

| Componente              | Descrição    |
|-------------------------|--------------|
| Potência nominal        | 1,5 [kW]     |
| Caudal nominal          | 16800 [kg/h] |
| Rendimento Geral $\eta$ | 100 %        |

## 4.2.2 Modelo de simulação da climatização dos restantes espaços do edifício

Para simular a climatização dos restantes espaços foi dado como entrada as necessidades sensíveis de aquecimento e de arrefecimento, calculadas previamente no *EnergyPlus* individualmente para zona. Para facilitar o modelo da central térmica, as diferentes zonas foram convertidas numa única zona em que a carga térmica horária é a contribuição de todas as zonas que compõem o edifício. Assim, o resultado é uma aproximação, contudo e porque se está a simular do ponto de vista dos equipamentos, o erro não é muito grande.

Como o edifício está a ser como uma zona, pelo que existe uma componente que introduz o ar necessário para manter a qualidade do ar do edifício, e os ventiloconvectores, fazendo recirculação do ar dos espaços, aquecem ou arrefecem os espaços, consoante as necessidades térmicas.

Primeiro vai ser analisado o sistema de tratamento de ar, de seguida o sistema utilizado para o aquecimento dos espaços, e, por último o arrefecimento.

### 4.2.2.1 Tratamento do ar

Para determinar o caudal necessário a insuflar em todo o edifício, foi consultado o projeto realizado, onde estão indicados os caudais de insuflação e de extração, para cada zona. Somaram-se os caudais todos de insuflação porque a extração não está a ser simulada no TRNSYS. Este elemento é o único que está a fazer o tratamento do ar dos espaços, sendo que é nestas baterias que entra o ar exterior.

Para tratar o ar dos espaços, o caudal calculado foi de 6530 m<sup>3</sup>/h de ar novo, sendo que este tem que ser insuflado em condições neutras. As condições neutras correspondem à temperatura preconizada para cada espaço (Tabela 4.7).

Tabela 4.7: Condições neutras de temperatura e humidade para a insuflação do tratamento do ar

| Estação | Temperatura [°C] | Humidade Absoluta [g/kg <sub>ar seco</sub> ] |
|---------|------------------|--|
| Inverno | 20               | 7  |
| Verão   | 25               | 9  |

A Figura 4.13 esquematiza os elementos presentes neste sistema. Um caudal de ar exterior de 6530m<sup>3</sup>/h atravessa os permutadores de frio e quente, permutadores estes que representam a UTA de ar novo. A bateria de frio é alimentada pelo *chiller* e a bateria de quente é alimentada pela caldeira. Ambas as baterias têm como variável de controlo a existência de necessidade térmica em cada instante de aquecimento, ou arrefecimento correspondente.

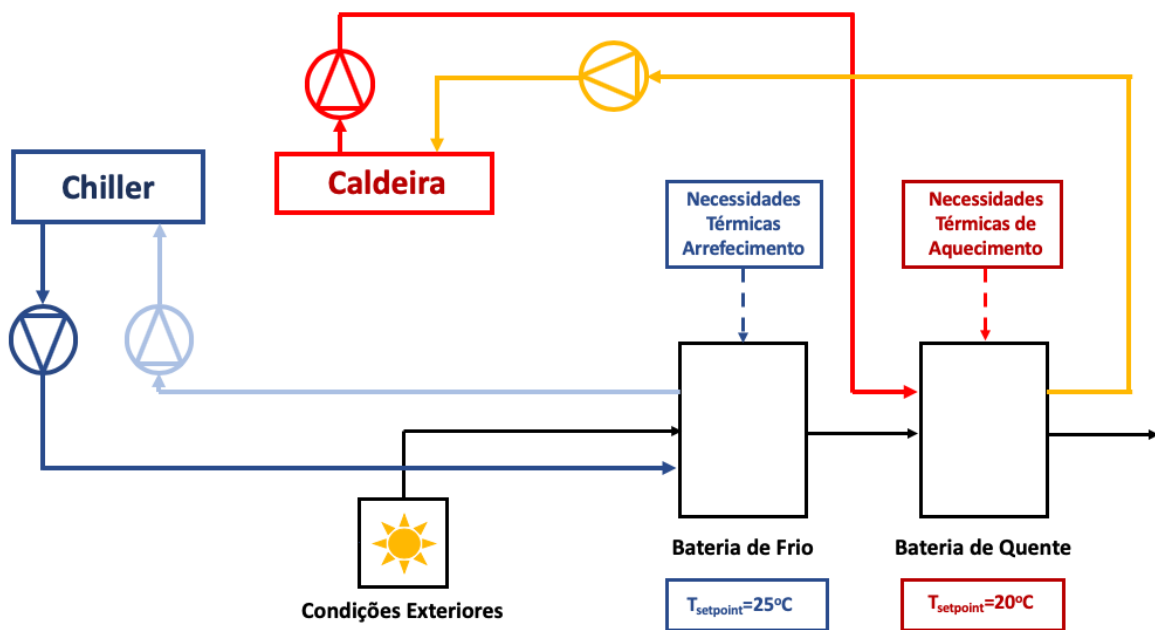


Figura 4.13: Esquema de princípio do sistema de tratamento de ar dos espaços do edifício.

A bateria de frio arrefece e desumidifica, e a bateria de quente aquece o ar para a temperatura desejada. Se não houver necessidades de arrefecimento, a bateria de frio apenas desumidifica.

As bombas de alimentação de água quente ou fria para cada uma das baterias estão controladas pela existência de carga térmica. Os controladores (ON/OFF) não estão representados diretamente na Figura 4.13, apenas a influência das necessidades térmicas. Estes controladores têm o comportamento representado no fluxograma da Figura 4.14

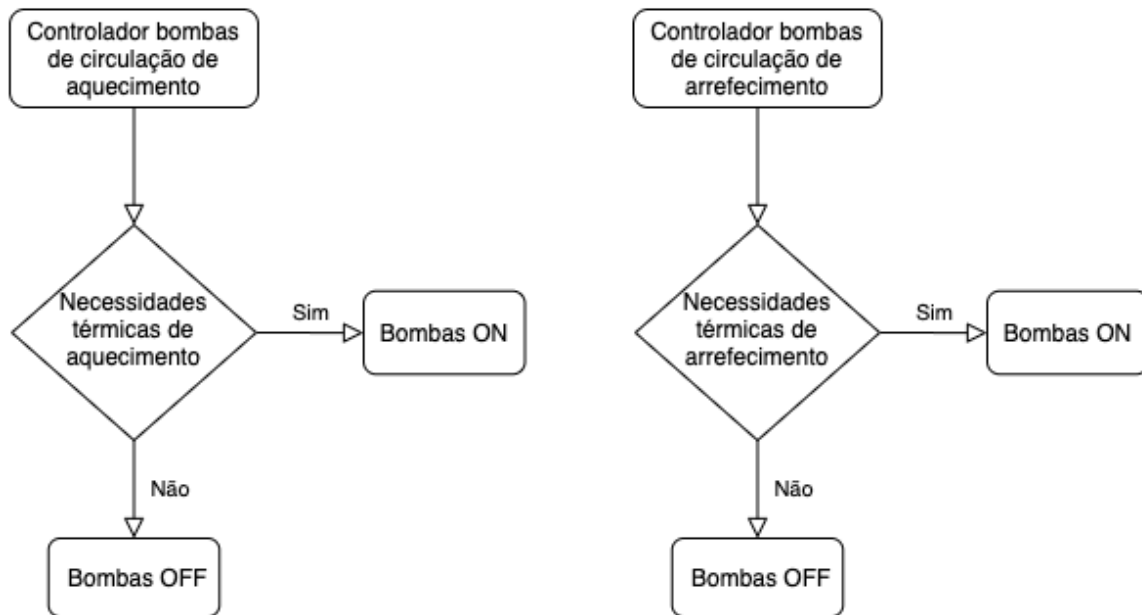


Figura 4.14: Fluxograma dos controladores das bombas do sistema de tratamento de ar dos espaços do edifício.

De seguida, o ar à saída das baterias é encaminhado para as baterias de quente e de frio que realizam o processo de aquecimento e arrefecimento que será analisado nas secções seguintes.

As características das bombas de circulação da água proveniente do *chiller* estão descritas na Tabela 4.8, e as das bombas de circulação da água proveniente da caldeira encontram-se na Tabela 4.9.

Tabela 4.8: Características das bombas de circulação da água fria utilizadas no tratamento de ar do modelo do sistema clássico

| Componente              | Descrição   |
|-------------------------|-------------|
| Potência Nominal        | 1,5 [kW]    |
| Caudal nominal          | 8235 [kg/h] |
| Rendimento Geral $\eta$ | 80 %        |

Tabela 4.9: Características das bombas de circulação da água quente utilizadas no tratamento de ar do modelo do sistema clássico

| Componente              | Descrição   |
|-------------------------|-------------|
| Potência Nominal        | 1,5 [kW]    |
| Caudal nominal          | 3950 [kg/h] |
| Rendimento Geral $\eta$ | 80 %        |

#### 4.2.2.2 Climatização

Para aquecer e arrefecer os espaços utilizou-se as necessidades térmicas sensíveis obtidas através do *software EnergyPlus*. O aquecimento e arrefecimento do ar é feito localmente com os ventiloconvectores, aquecendo o ar que já se encontra no espaço, até se atingir a temperatura desejada para nesse espaço. Assim, este elemento serve apenas para colmatar as necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento dos espaços, e não para o tratamento de ar. A Figura 4.15 esquematiza os elementos envolvidos neste processo.

O cálculo do caudal de ar recirculado necessário para o aquecimento na totalidade dos espaços é função do gradiente térmico e pode ser determinado pela expressão 4.6. O valor utilizado para o gradiente térmico máximo foi de 8°C, correspondente à diferença das temperaturas de *setpoint* e de insuflação.

$$\dot{m}_{aq} = \frac{q_{aq}}{1,005 * \Delta T} * 3600 \quad (4.6)$$

As características do ponto de *setpoint* definido para o aquecimento estão descritas na tabela 4.10

Tabela 4.10: Condições de *setpoint* para o aquecimento dos espaços

|                   |                              |
|-------------------|------------------------------|
| Temperatura       | 25 [°C]                      |
| Humidade Absoluta | 9 [g/kg <sub>ar seco</sub> ] |

O caudal de ar recirculado necessário ao arrefecimento na totalidade dos espaços foi calculado através da expressão 4.7. O valor utilizado para o  $\Delta T$  foi de 8°C, correspondente à diferença das temperaturas de *setpoint* e de insuflação.

$$\dot{m}_{arr} = \frac{q_{arr}}{1,005 * \Delta T} * 3600 \quad (4.7)$$

As características do ponto de *setpoint* definido para o aquecimento estão descritas na Tabela 4.11

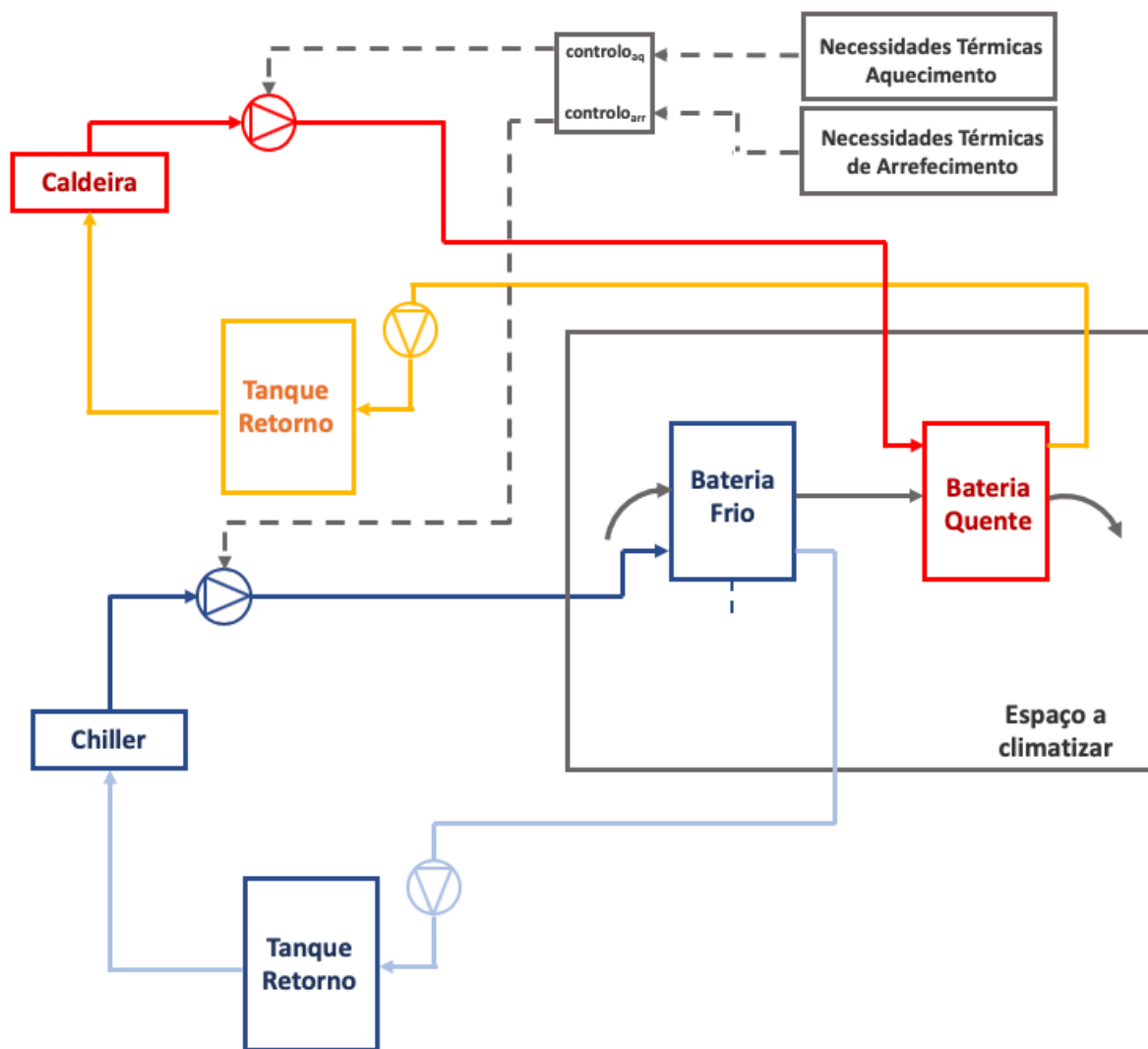


Figura 4.15: Esquema do conceito do aquecimento dos espaços do edifício.

Tabela 4.11: Condições de *setpoint* para o arrefecimento dos espaços

|                   |                              |
|-------------------|------------------------------|
| Temperatura       | 20 [°C]                      |
| Humidade Absoluta | 7 [g/kg <sub>ar seco</sub> ] |

Foi criada, depois, uma variável de controlo que controla a bomba de alimentação da água da bateria de quente, assim como a de retorno. O seu funcionamento encontra-se esquematizado no fluxograma da Figura 4.16.

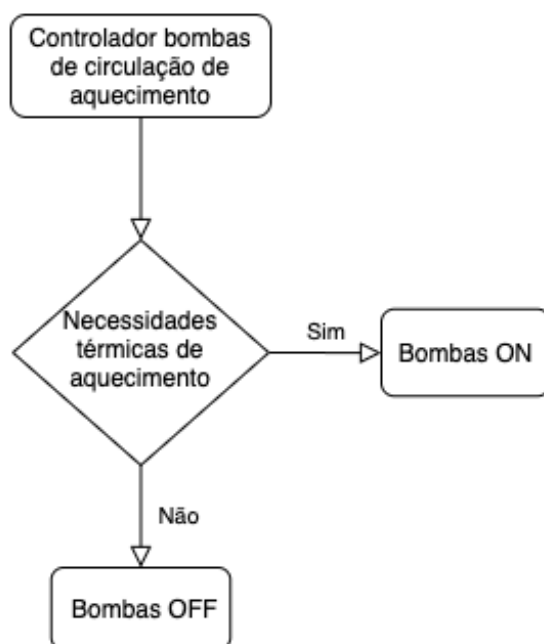


Figura 4.16: Fluxograma dos controladores das bombas do sistema de aquecimento dos espaços do edifício.

O caudal de água em circulação é de 3950 [l/h], e o volume do tanque é de 8 m<sup>3</sup>. O tanque de retorno permite recolher as águas de retorno de todas as utilizações da caldeira (UTA, aquecimento, AQS e piscinas).

As bombas de circulação são caracterizadas pelos valores descritos na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Características das bombas de circulação utilizadas no aquecimento dos espaços do modelo do sistema clássico

| Componente              | Descrição   |
|-------------------------|-------------|
| Potência Nominal        | 1,5 [kW]    |
| Caudal nominal          | 3950 [kg/h] |
| Rendimento Geral $\eta$ | 80 %        |

A variável de controlo utilizada controla a bomba de alimentação da água da bateria de frio, assim como a de retorno. O seu funcionamento encontra-se esquematizado no fluxograma da Figura 4.17.

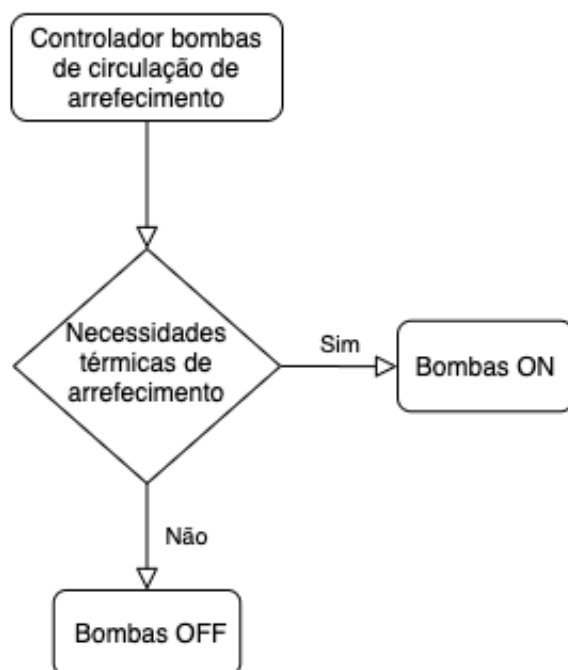


Figura 4.17: Fluxograma dos controladores das bombas do sistema de arrefecimento dos espaços do edifício.

O caudal de água em circulação é de 8235 [l/h], e o volume do tanque é de 8 m<sup>3</sup>. O tanque de retorno permite recolher as águas de retorno de todas as utilizações do chiller (UTA e arrefecimento).

As características das bombas de circulação utilizadas estão descritas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Características das bombas de circulação do *chiller* utilizadas no arrefecimento dos espaços do modelo do sistema clássico

| Componente               | Descrição   |
|--------------------------|-------------|
| Potência Nominal         | 1,5 [kW]    |
| Caudal nominal           | 8235 [kg/h] |
| Rendimento Global $\eta$ | 0,8         |

### 4.2.3 Modelo de simulação da instalação de coletores solares térmicos

Para esta componente da simulação foram utilizados painéis solares térmicos do modelo A200 com as especificações mais próximas das descritas no Anexo B, dentro das limitações dos programa. No TRNSYS trata-se de um *Flat Plate Collector*. Estes painéis encontram-se a 30°, tal como preconizado no projeto. No total, utilizaram-se 121 coletores solares. Sabendo

que a área de um coletor é de  $2,55 \text{ m}^2$ , tem-se uma área total de coletores de  $308,55 \text{ m}^2$ . Existem 5 coletores colocados em série, e os restantes em paralelo.

O modelo a implementar no TRNSYS encontra-se esquematizada na Figura 4.18.

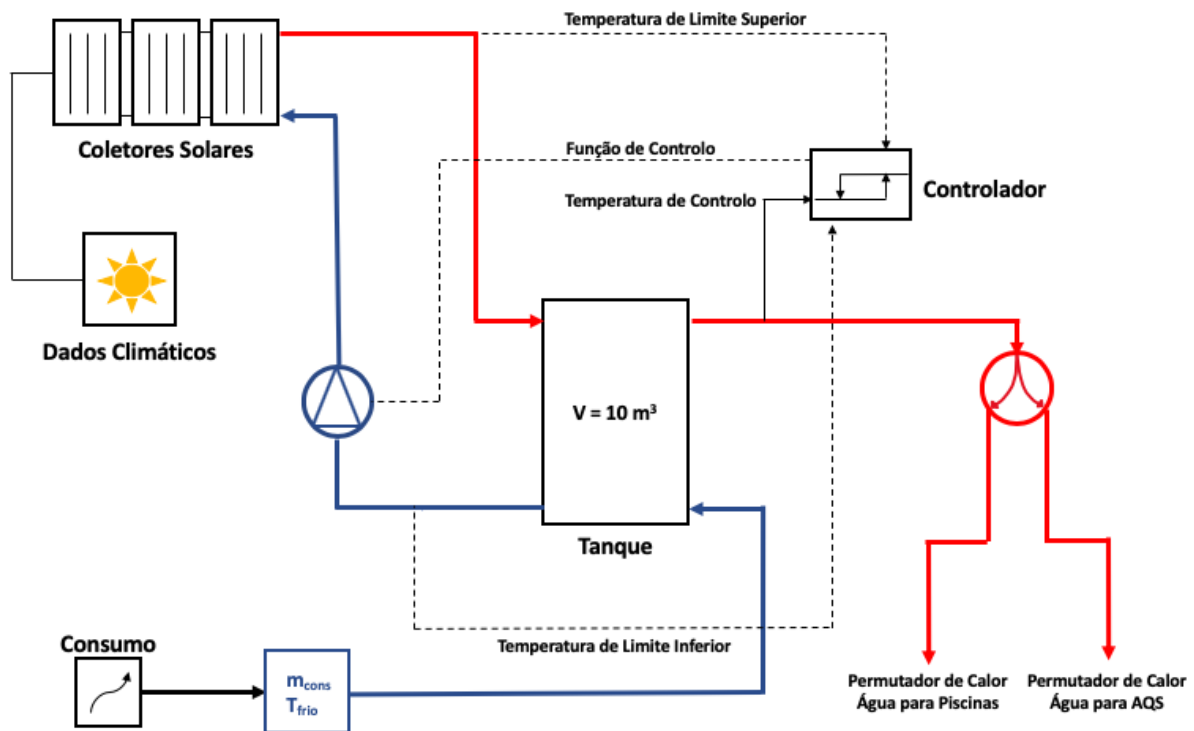


Figura 4.18: Esquema do conceito do sistema de aquecimento de água por via de painéis solares térmicos.

Existe uma função de consumo semelhante à do consumo de AQS presente no Anexo C, que é considerada a mais adequada para o caudal em circulação nesta instalação. De seguida, os valores desta função são posteriormente multiplicados pelo caudal efetivo de consumo de água fria para o funcionamento do sistema dos coletores solares. Os valores para o caudal e a temperatura de água fria encontram-se presentes na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Características da água fria de consumo para funcionamento dos coletores solares

| Variável  | Valor        |
|---|--------------|
| Caudal nominal de consumo ( $\dot{m}_{\text{cons}}$ ) | 226860 [l/h] |
| Temperatura da água fria ( $T_{\text{frio}}$ )        | 15 [°C]      |

A água fria mistura-se num tanque de inércia com a água quente que vem dos coletores solares. De forma a controlar a temperatura da água que irá sair para os permutadores de



calor para as piscinas e para o AQS, que serão analisados à frente na secção 4.2.4, utilizou-se um controlador ON/OFF com histerese (tabela 4.15) que controla a bomba de alimentação dos coletores. Este controlador utiliza como temperatura de limite superior a temperatura de saída direta dos coletores (tabela 4.16), e a temperatura de limite inferior é a temperatura de entrada da bomba. Assim, emite um sinal igual a 1 se a temperatura do tanque estiver dentro dos parâmetros, e 0 se estiver fora.

Tabela 4.15: Características do controlador ON/OFF com histerese utilizado na instalação de produção AQS por solar térmico

| Variável                             | Valor    |
|--------------------------------------|----------|
| Número de oscilações                 | 5        |
| Temperatura de Limite <i>Cut-out</i> | 100 [°C] |
| <i>Deadband</i> dT superior          | 6 [°C]   |
| <i>Deadband</i> dT inferior          | 2 [°C]   |

Por fim, na outra saída do tanque de inércia, a água quente é encaminhada para os permutadores de calor para as piscinas e AQS, como já foi indicado.

Os colectores solares térmicos utilizados na instalação têm um rendimento óptico de 0,744 e uma potencia máxima de 1534W, as restantes características estão descritas no Anexo B.

Tabela 4.16: Características da bomba de circulação da componente da produção de solar térmico

| Variável            | Valor        |
|---------------------|--------------|
| Porência nominal    | 1,5 [kW]     |
| Caudal nominal      | 11340 [kg/h] |
| Rendimento global   | 0,6          |
| Rendimento do motor | 0,9          |

#### 4.2.4 Modelo de simulação da produção de água quente para as piscinas e AQS

Nesta secção do modelo é necessário misturar a água quente produzida na caldeira, com a água quente produzida nos coletores solares, dando prioridade a estes. A Figura 4.19 apresenta um esquema de conceção do modelo construído para simulação a central térmica.

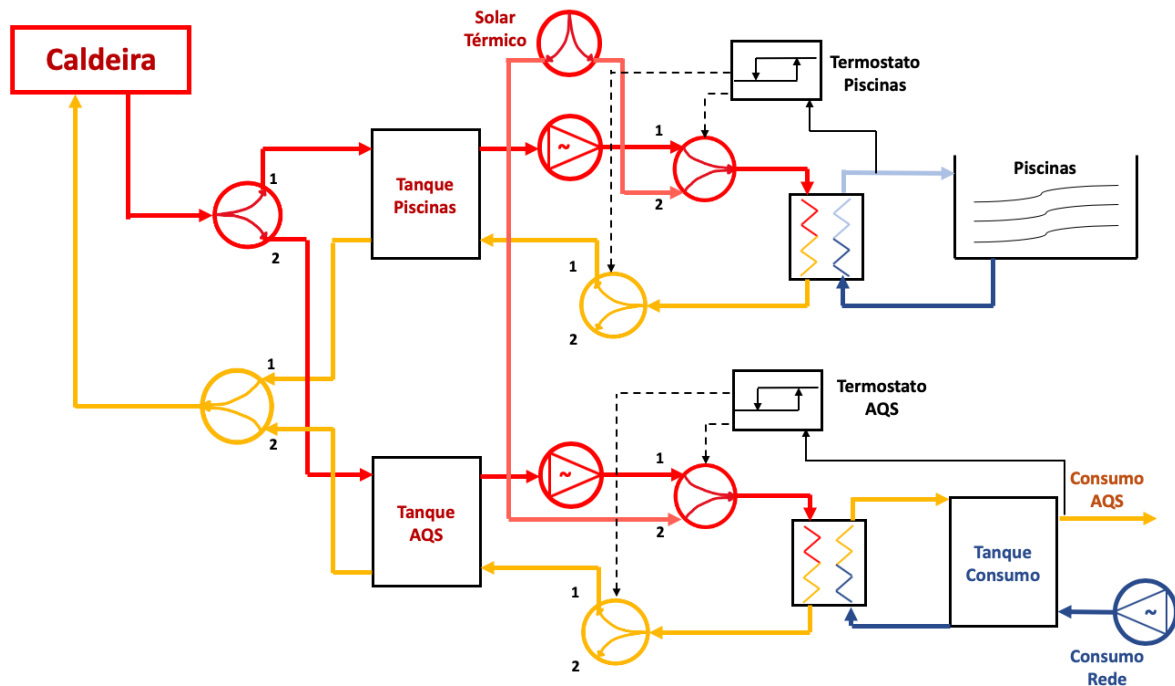


Figura 4.19: Esquema do conceito do sistema montagem para o consumo de AQS e das piscinas.

A caldeira envia água quente para os tanques de inércia correspondentes. A água é posteriormente bombeada para uma válvula de duas entradas, onde a segunda entrada corresponde à água quente produzida pelo sistema de coletores solares térmicos. Esta válvula mistura estes dois caudais, mediante uma ordem de controlo de um termostato definido para a temperatura de consumo tanto das piscinas como de AQS, e assim, aumenta a fração proveniente da caldeira, caso a temperatura seja muito baixa (e o sistema solar térmico não é suficiente). Este termostato também controla a válvula de divisão à saída do permutador de calor, de forma a que haja o mesmo caudal a circular em cada um dos circuitos. As temperaturas para as quais os termostatos devolvem o sinal ON estão descritas na Tabela 4.17, e o seu funcionamento encontra-se esquematizado no fluxograma da Figura 4.20.

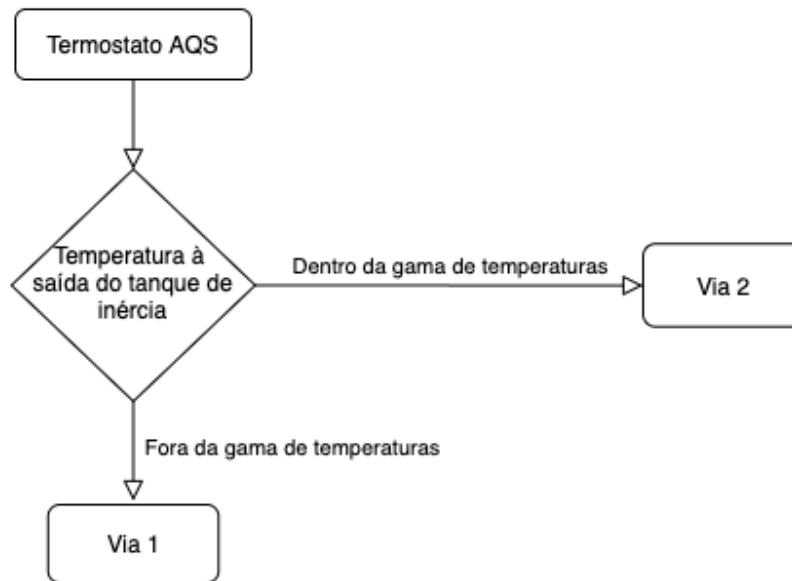


Figura 4.20: Fluxograma dos controladores das bombas do sistema de produção de AQS e piscinas.

Tabela 4.17: Gama de temperaturas dos controladores ON/OFF que controlam as válvulas de mistura das piscinas e AQS

| Controlador | Gama de temperatura ON [°C] |
|-------------|-----------------------------|
| Piscinas    | 34 - 40                     |
| AQS         | 45 - 60                     |

Quando este sinal é devolvido, a água que é enviada para o permutador de valor vem dos coletores solares, não necessitando da caldeira. Se a temperatura estiver abaixo destes valores, necessita-se do auxílio da caldeira até atingir as temperaturas ideais novamente.

Como já referido anteriormente, o aquecimento da água das piscinas é realizado através das necessidades térmicas de aquecimento das piscinas. Estes valores compreendem as perdas por evaporação e a compensação do caudal. Com as referidas necessidades térmicas foi utilizada a expressão 4.8

$$Q_{aqPiscinas} = \dot{m}_{piscinas} * c_p * \Delta T \quad (4.8)$$

O  $c_p$  é o da água salgada e é igual a 3,85 [kJ/kgK], o  $\Delta T$  utilizado foi de 8°C, para não se sentir desconforto nas piscinas, e, assim, foi possível determinar o caudal de água quente necessário para cada hora, em função das necessidades térmicas de aquecimento.

Para o AQS, foi determinado o consumo horário necessário, descrito no Anexo C. Este é bombeado para um tanque de inércia à temperatura da rede (cerca de 15°C), depois troca calor com a água quente e volta a entrar no tanque. A água mais quente à saída do tanque é a água para consumo. É normal que seja necessário mais caudal de água quente para o AQS do que para as piscinas, pois o permutador de calor das piscinas apenas tem que aquecer água cerca de 10°C, e o permutador do AQS tem que aquecer bastante mais.

Por último, os caudais de retorno dos tanques de AQS e das piscinas retornam à caldeira. Na tabela 4.18 estão apresentadas as características da bomba do circuito do aquecimento das piscinas (Bomba Piscinas), a bomba do primário da produção de AQS (Bomba AQS), e ainda a bomba de abastecimento relativa ao consumo de AQS (Bomba Consumo).

Tabela 4.18: Características das bombas envolvidas no circuito da produção de água quente para as piscinas e AQS

| Bomba            | Bomba Piscinas | Bomba AQS    | Bomba Consumo |
|------------------|----------------|--------------|---------------|
| Potência nominal | 1,5 [kW]       | 3,0 [kW]     | 1,5 [kW]      |
| Caudal nominal   | 11340 [kg/h]   | 25000 [kg/h] | 11340 [kg/h]  |

### 4.3 Modelo de simulação do sistema com Bombas de Calor

O sistema simulado é, na sua base, muito semelhante ao anterior, sendo que se mantiveram muitas das componentes base de estudo. O objetivo desta simulação é de baixar os consumos do projeto inicial, para tal colocando duas bombas de calor, mais uma caldeira auxiliar para o AQS e para as piscinas. Assim, uma bomba de calor ar-ar foi utilizada para a UTA das piscinas, e uma bomba de calor água-água, com um permutador de calor na água do mar, foi utilizada para o aquecimento e arrefecimento dos espaços.

#### 4.3.1 Simulação da UTA das Piscinas

Para a simulação da UTA, foi mantido o mesmo sistema. Apesar de se preconizar uma bomba de calor ar-ar, uma bomba de calor e um *chiller* são sistemas muito semelhantes, pelo que neste caso apenas muda o fluido de trabalho que deixa de ser água, e passa a ser um fluido frigorigéneo. Assim, com os mesmos componentes que já se tinham instalado anteriormente na secção 4.2.1, foi possível simular o tratamento do ar na UTA da zona das Piscinas. Teoricamente, o que se pretendeu simular foi o conceito representado na Figura 4.21. O controlo de humidade é realizado da mesma forma que a descrita na secção 4.2.1. A maior diferença é que como a bomba de calor não permite fornecer água quente e fria em simultâneo, não existe o pré-aquecimento feito pela primeira bateria de quente que a recuperação do *chiller* fazia. Quando

não há necessidades de desumidificação, a bomba de calor produz água quente diretamente, para aquecer o ar.

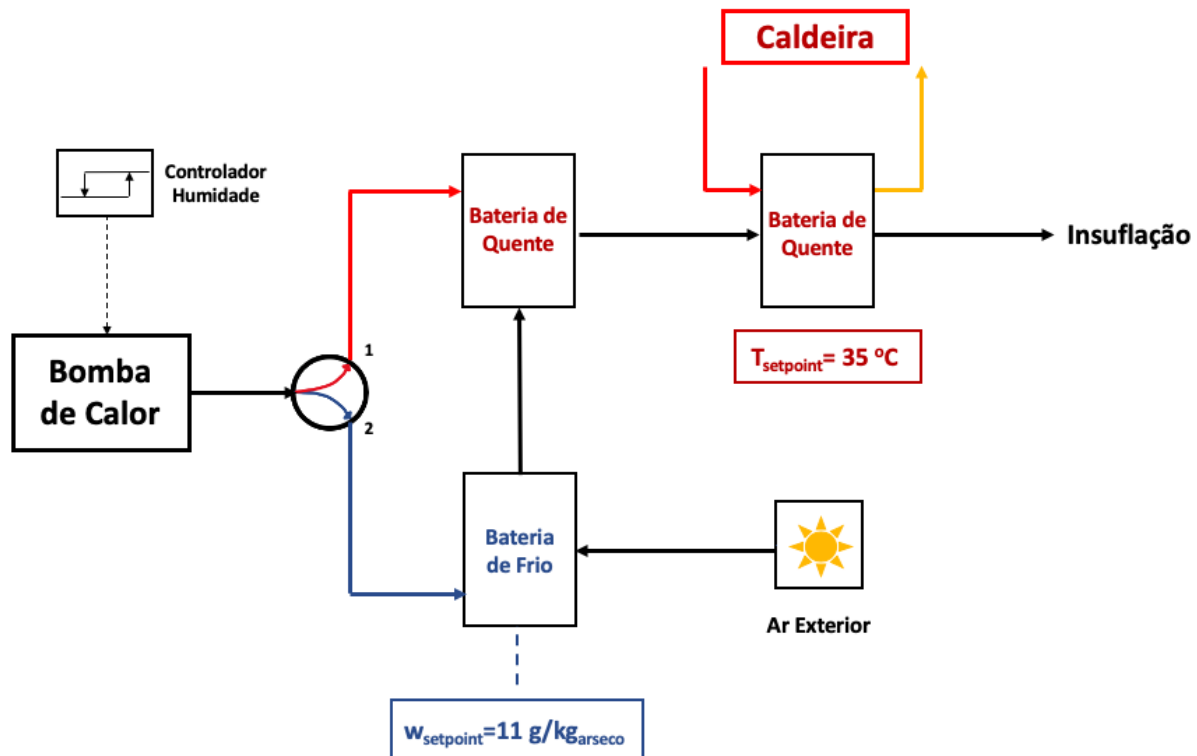


Figura 4.21: Representação esquemática de um sistema de climatização que utiliza uma UTA alimentada por uma bomba de calor e uma caldeira.

Dado que o sistema de distribuição e controlo do ar é o mesmo da figura e que é igual ao da Figura 4.21, optou-se por não o representar para facilitar a análise.

Note-se, também, que a segunda bateria de quente é alimentada por outra fonte de calor, que neste caso, é proveniente da caldeira que está a auxiliar a produção de AQS. Na Figura 4.19 é possível verificar que, devido à atuação do termostato do AQS, existe sempre uma parte de água quente a ser desperdiçada da válvula de retorno antes de entrar no tanque de AQS. Este fluxo é utilizado, neste caso, para alimentar a bateria de quente, e verificar-se-á que é suficiente para manter o ar a 35 °C.

Para simplificar, a Figura 4.22 esquematiza o que foi realizado no TRNSYS (em que se usou um *chiller* como bomba de calor), sendo possível verificar o *chiller* e a sua recuperação controlada pelo controlador da humidade (que determina se há arrefecimento ou não), de forma a não produzir água quente e fria ao mesmo tempo, funcionando, assim, como uma bomba de calor. A segunda bateria de quente é alimentada pela caldeira presente no sistema de AQS,

como já referido. Por uma questão de simplificação esquemática, os controladores dos tanques, que ligam e desligam os equipamentos não foram representados.

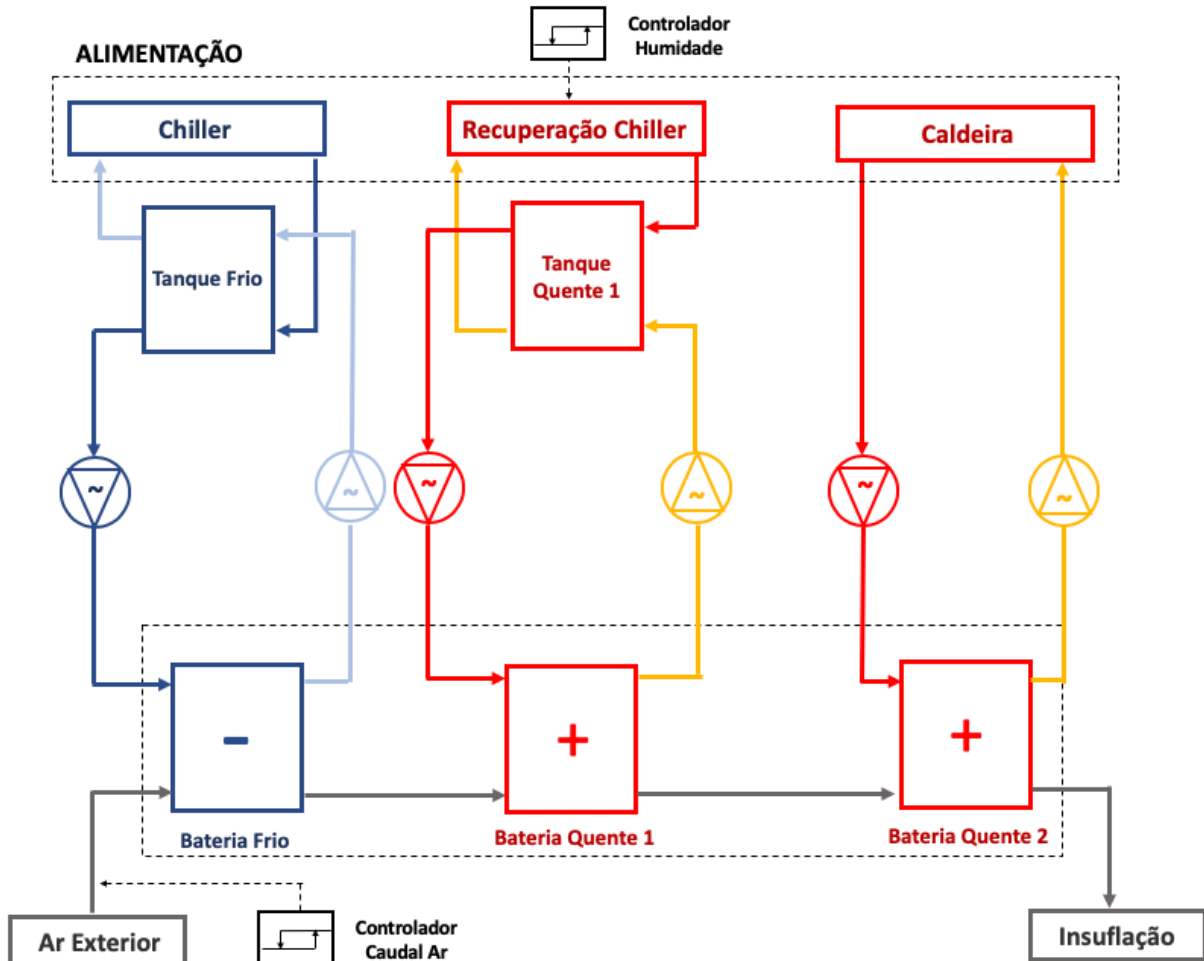


Figura 4.22: Esquema do conceito da UTA das piscinas para a simulação das bombas de calor.

A bomba de calor utilizada tem as características descritas na Tabela 4.19.

Tabela 4.19: Características da Bomba de Calor Ar-Ar para a UTA das Piscinas

| Variável                          | Valor         |
|-----------------------------------|---------------|
| Potência Nominal de arrefecimento | 300 [kW]      |
| Potência Nominal de aquecimento   | 200 [kW]      |
| Fluido Frigorigéneo               | R-32          |
| Caudal nominal                    | 158000 [kg/h] |
| EER                               | 4,1           |
| COP                               | 3,7           |

As bombas de circulação tem as características descritas na Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Características das Bombas de circulação usadas no circuito da UTA das Piscinas

| Variável                     | Valor        |
|------------------------------|--------------|
| Potência Nominal             | 1,5 [kW]     |
| Caudal Nominal               | 16900 [kg/h] |
| Rendimento Global ( $\eta$ ) | 0,8          |
| Rendimento do Motor          | 0,9          |

### 4.3.2 Modelo de simulação da climatização dos restantes espaços do edifício

Esta componente do modelo é assegurada por uma bomba de calor água-água, com um permutador de calor que utiliza a água do mar como fonte. Isto permite aumentar a eficiência da bomba de calor porque a temperatura da água do mar em Porto Santo varia muito pouco durante o ano, e apresenta uma temperatura relativamente elevada, como já referido no Capítulo 3. Tal como no primeiro modelo de simulação, é necessário ventilar os espaços para manter a qualidade do ar, e também aquecê-lo ou arrefecê-lo para vencer as necessidades térmicas de aquecimento ou arrefecimento, respetivamente.

Está prevista a instalação de uma bomba de calor água/água com as características descritas na Tabela 4.21. No arrefecimento, a bomba funciona a 25% da carga total, não sendo necessária toda essa potência de arrefecimento.

Tabela 4.21: Características das Bombas de circulação usadas no circuito da UTA das Piscinas

| Variável  | Valor        |
|---|--------------|
| Capacidade de aquecimento da bomba                | 300 [kW]     |
| Capacidade de arrefecimento da bomba              | 200 [kW]     |
| Potência elétrica necessária para o aquecimento   | 80 [kW]      |
| Potência elétrica necessária para o arrefecimento | 50 [kW]      |
| Caudal nominal da bomba de calor                  | 16900 [kg/h] |
| COP na produção de calor                          | 3,75         |
| COP na produção de frio                           | 4,17         |

O permutador de calor água salgada - água doce, que troca calor entre a água proveniente do mar e a água consumida pela bomba de calor, é um permutador de fluxos cruzados não miscíveis e tem um coeficiente de transferência de calor global de 2780 [kW/K].

Neste caso, representa-se o tratamento do ar em conjunto com o aquecimento e o arrefecimento, apenas com a circuito correspondente, sabendo que no sistema global tem o circuito de água quente e o de água fria. Faz-se esta simplificação gráfica para um melhor entendimento esquemático.

#### 4.3.2.1 Aquecimento

Para o aquecimento do ar, quando a bomba de calor produz água quente, esta é desviada para um tanque de água quente. A bomba de calor só produz água quente quando existem necessidades térmicas de aquecimento, que é um dos ficheiros de dados de entrada. Assim, controla-se a válvula divergente à saída da bomba, permitindo que a água fria vá para um tanque de água fria, e a água quente para um tanque de água quente.

Foi utilizado este processo em vez de um *fan coil*, ou ventiloconvector, porque oTRNSYS não permitia simular com um *fan coil* sem o edifício estar simulado diretamente através do *Trnsbuild*. Assim, utilizou-se o mesmo sistema que na UTA das piscinas, com uma bateria de quente e uma bateria de frio, separadamente.

Considerou-se 100% de ar novo para o tratamento do ar, mas para o aquecimento considerou-se o ar que já está tratado e no interior do edifício a uma temperatura controlada.

A Figura 4.23 representa um esquema simplificado da montagem realizada no TRNSYS, para melhor se compreender os processos.



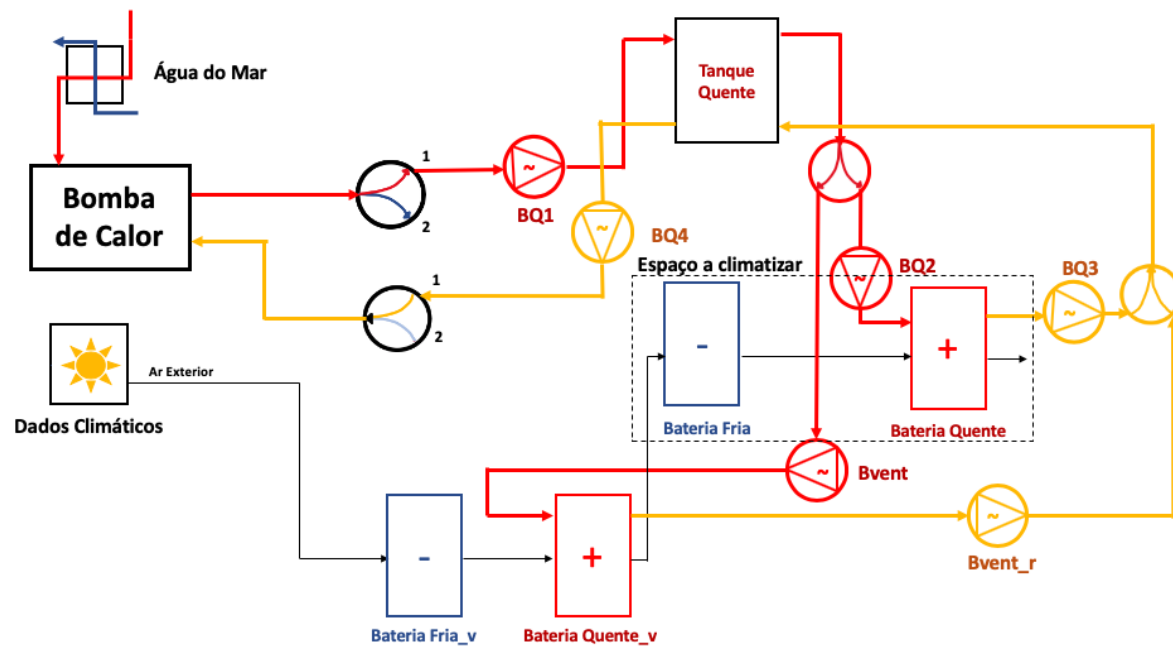


Figura 4.23: Esquema do conceito do aquecimento e tratamento do ar dos espaços para a simulação das bombas de calor.

À saída do tanque quente, a água mais quente é dividida em dois caudais, um para a tratamento do ar e outro para o aquecimento. O caudal da tratamento do ar é bombeado pela bomba *Bvent* para a bateria de quente da tratamento do ar, e retornado pela bomba *Bvent\_r*. O caudal do aquecimento é bombeado pela bomba *BQ2* para a bateria de quente de aquecimento, e retornado pela bomba *BQ3*. O caudal à saída das bombas *BQ3* e *Bvent\_r* juntam-se então e são encaminhados de volta para o tanque e bombeados pela bomba *BQ4* para uma válvula de mistura, que mistura este caudal com o retorno do ciclo de arrefecimento, para o retorno da bomba de calor.

As válvulas de separação quente e frio (numeradas com fluxos 1 e 2) têm que estar controladas pela mesma variável para haver o mesmo caudal a sair e a retornar à bomba.

A variável que faz a divisão dos caudais tem o comportamento indicado no fluxograma presente na Figura 4.24, sendo que se não existem necessidades de aquecimento, existem necessidades de arrefecimento.

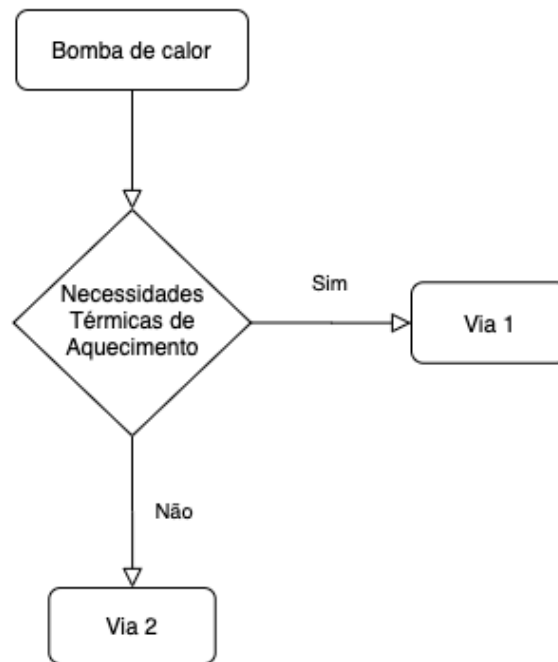


Figura 4.24: Fluxograma dos controladores das válvulas de duas vias no sistema de climatização dos espaços (Vias referentes à Figura 4.23).

As temperaturas de *setpoint* das baterias estão descritas na Tabela 4.22. Assim, tal como já se tinha descrito na secção 4.2.2, para a tratamento do ar considerou-se a temperatura desejada para o espaço. Por exemplo, em época de aquecimento, ou seja, no inverno, a bateria de quente de ventilação tem um *setpoint* de 20°C pois essa é a temperatura confortável para essa estação. Porém, para satisfazer as necessidades térmicas de aquecimento, como se considerou um  $\Delta T$  de 5°C, considera-se insuflar o ar a 25°C, pelo que o *setpoint* da bateria de quente foi 25°C. O mesmo se passa nas baterias de frio.

Tabela 4.22: Temperaturas de *Setpoint* das Baterias usadas para a instalação de aquecimento e tratamento do ar dos espaços para a simulação com bombas de calor

| Bateria          | Temperatura <i>Setpoint</i> [°C] |
|------------------|----------------------------------|
| Bateria Fria     | 20                               |
| Bateria Fria_v   | 25                               |
| Bateria Quente   | 25                               |
| Bateria Quente_v | 20                               |

As bombas de circulação do circuito de aquecimento têm todas características idênticas que estão descritas na Tabela 4.23, e a caracterização das bombas que alimentam o circuito de tratamento do ar está detalhada na Tabela 4.24.

Tabela 4.23: Características das bombas de circulação no circuito de aquecimento dos espaços para a simulação com bombas de calor

| Variável          | Valor        |
|-------------------|--------------|
| Potência nominal  | 3 [kW]       |
| Caudal nominal    | 16900 [kg/h] |
| Rendimento global | 0,8          |
| Rendimento motor  | 0,9          |

Tabela 4.24: Características das bombas de circulação no circuito de tratamento do ar no aquecimento dos espaços para a simulação com bombas de calor

| Variável          | Valor       |
|-------------------|-------------|
| Potência nominal  | 1,5 [kW]    |
| Caudal nominal    | 8235 [kg/h] |
| Rendimento global | 0,8         |
| Rendimento motor  | 0,9         |

#### 4.3.2.2 Arrefecimento

Em oposição ao aquecimento do ar, quando a bomba de calor produz água fria, esta é desviada para um tanque de água fria. A bomba de calor só produz água fria quando existem necessidades térmicas de arrefecimento - um dos ficheiros de dados de entrada.

Considerou-se 100% de ar novo para o tratamento do ar, mas para o arrefecimento considerou-se o ar que já está tratado e no interior do edifício a uma temperatura controlada.

A Figura 4.25 apresenta um esquema simplificado da montagem realizada no TRNSYS, para melhor se compreender os processos.

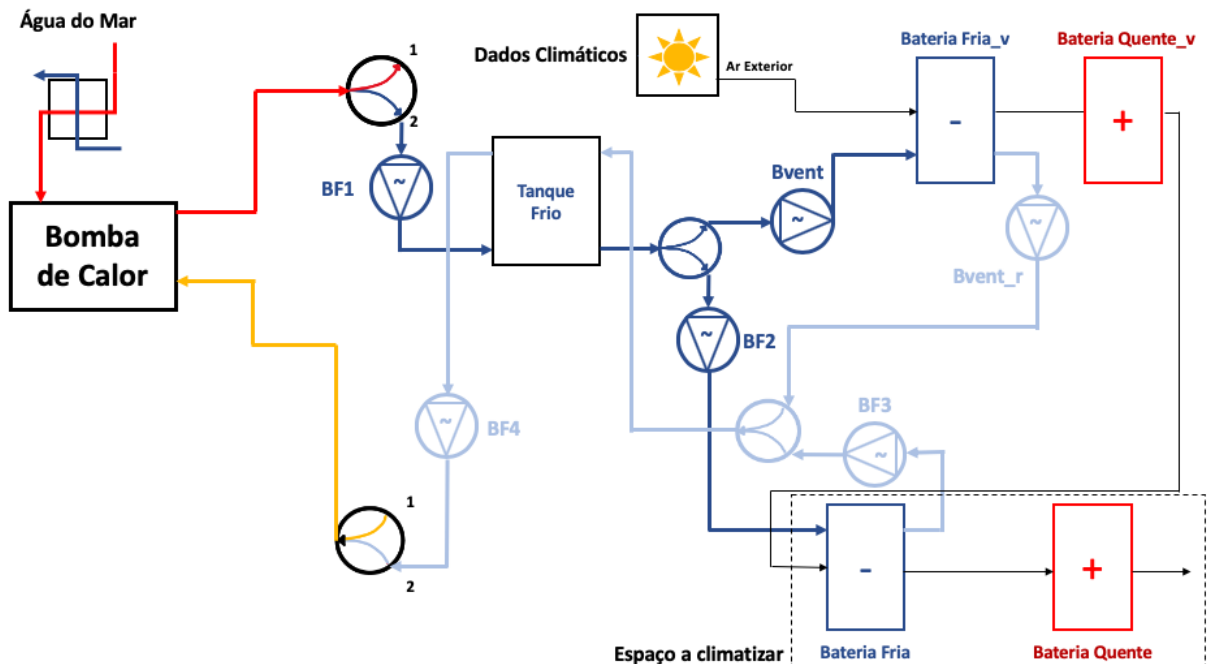


Figura 4.25: Esquema do conceito do arrefecimento e tratamento do ar dos espaços para a simulação das bombas de calor.

À saída do tanque frio, a água mais fria é dividida em dois caudais, um para o tratamento do ar e outro para o arrefecimento. O caudal do tratamento do ar é bombeado pela bomba *Bvent* para a bateria de frio da ventilação, e retorna pela bomba *Bvent\_r*. O caudal do arrefecimento é bombeado pela bomba *BF2* para a bateria de frio do arrefecimento, e retorna pela bomba *BF3*. O caudal à saída das bombas *BF3* e *Bvent\_r* juntam-se e são encaminhados de volta para o tanque e bombeados pela bomba *BF4* para uma válvula de mistura, que mistura este caudal com o retorno do ciclo de aquecimento, para o retorno da bomba de calor.

As temperaturas de *setpoint* das baterias estão descritas na Tabela 4.22, são as mesmas, sendo este o mesmo sistema. As Figuras 4.23 e 4.25 complementam-se no circuito hidráulico, sendo o sistema o mesmo.

As bombas de circulação que alimentam o circuito de arrefecimento são todas idênticas e as suas características encontram-se detalhadas na Tabela 4.25. Quanto às bombas do circuito de tratamento do ar, os seus detalhes estão descritos na Tabela 4.26.

Tabela 4.25: Características das bombas de circulação no circuito de arrefecimento dos espaços para a simulação com bombas de calor

| Variável          | Valor        |
|-------------------|--------------|
| Potência nominal  | 2684 [kJ/h]  |
| Caudal nominal    | 16900 [kg/h] |
| Rendimento global | 0,8          |
| Rendimento motor  | 0,9          |

Tabela 4.26: Características das bombas de circulação no circuito de tratamento do ar no arrefecimento dos espaços para a simulação com bombas de calor

| Variável          | Valor       |
|-------------------|-------------|
| Potência nominal  | 5000 [kJ/h] |
| Caudal nominal    | 8235 [kg/h] |
| Rendimento global | 0,8         |
| Rendimento motor  | 0,9         |

### 4.3.3 Modelo de simulação da instalação de coletores solares térmicos

O modelo de simulação da instalação dos coletores solares térmicos é idêntica à utilizada para a primeira simulação e foi explicada em detalhe na secção 4.2.3.

### 4.3.4 Modelo de simulação da produção de água quente para as piscinas e AQS

O modelo referente à produção de água quente para AQS e para as piscinas é idêntica à utilizada para a primeira simulação e foi explicada em detalhe na secção 4.2.4. A única diferença é que neste sistema a caldeira existente é uma caldeira auxiliar, sendo o seu único propósito a produção de água quente para estes dois fins caso não exista energia suficiente proveniente dos coletores solares.

A caldeira utilizada tem as características descritas na Tabela 4.27.

Tabela 4.27: Características da Caldeira utilizada para a produção de água quente para AQS e Piscinas

| Variável                       | Valor    |
|--------------------------------|----------|
| Potência Nominal               | 400 [kW] |
| Rendimento Térmico $\eta$      | 0,90     |
| Rendimento da Combustão        | 0,85     |
| Temperatura de <i>Setpoint</i> | 90 [°C]  |

## 4.4 Simulação do sistema com Trigeração

O sistema simulado foi, na sua base, muito semelhante aos anteriores, sendo que se mantiveram muitas das componentes base de estudo. O objetivo desta simulação é de baixar os consumos do projeto inicial, um sistema de cogeração associado a um *chiller* de absorção, mais uma caldeira auxiliar para o AQS e para as piscinas. O sistema de cogeração produz água quente que alimenta o *chiller* de absorção e os sistemas que necessitam de água quente, sendo a caldeira utilizada como auxílio. A unidade de cogeração produz, também, eletricidade, graças ao motor de combustão interna (MCI), e a sua produção será analisada mais em detalhe no Capítulo 5.

### 4.4.1 Modelo de simulação da Unidade de Cogeração

A unidade de cogeração produz água quente para o *chiller* e para os sistemas de água quente. Assim tal como foi explicado na Secção 2.7, esta é composta por um motor de combustão interna, que utiliza os gases de exaustão e a sua água de de arrefecimento para produzir água quente para utilização de outros sistemas.

Na Figura 4.26 mostra-se uma representação esquemática da montagem do sistema feito no TRNSYS.

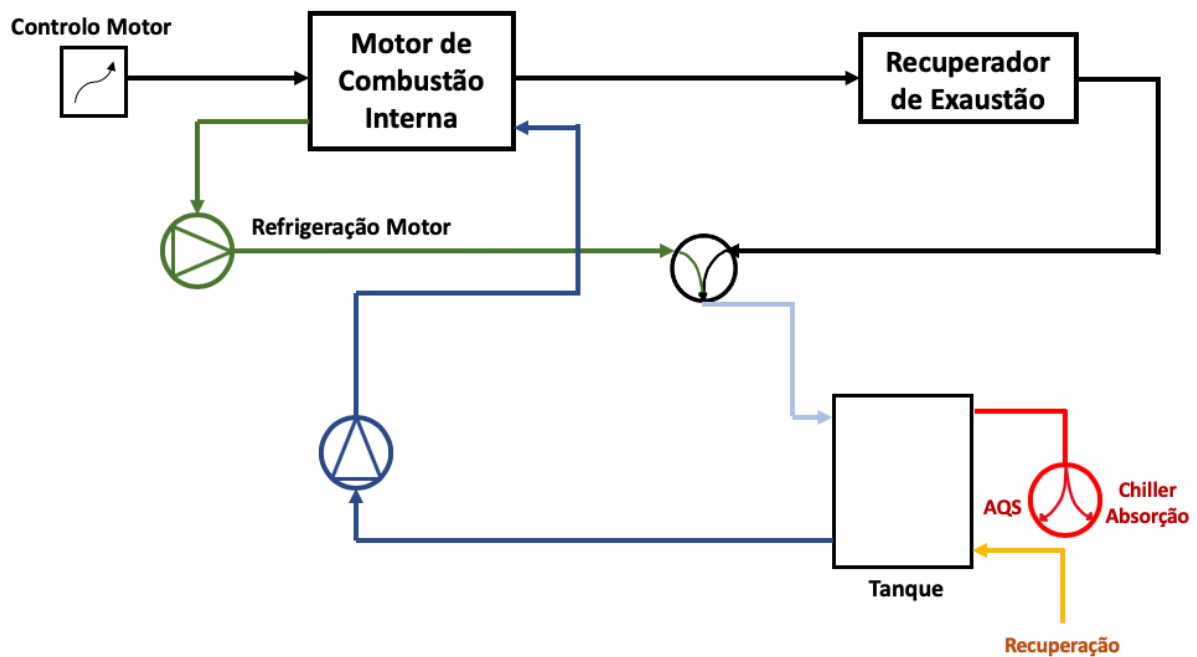


Figura 4.26: Esquema do conceito do sistema de cogeração da simulação para a trigeração.

À saída do MCI, os gases de exaustão vão para um recuperador, ou uma torre, e seguem depois para um permutador de calor, onde vão trocar calor com a água de refrigeração do motor, e a água mais fria do tanque. A água segue, depois, para o tanque, e de volta para o motor, mantendo temperaturas mais moderadas tanto na água de refrigeração do motor, como na água de utilização que segue para o *chiller* de absorção ou para o sistema de AQS. O tanque também recebe a recuperação destes sistemas para fazer o equilíbrio mássico. O objetivo é que a água para consumo dos sistemas tenha uma temperatura de cerca de 90°C. O MCI tem as características descritas na Tabela 4.28.

Tabela 4.28: Características do MCI utilizado na unidade de cogeração na simulação com trigeração

| Variável                  | Valor        |
|---------------------------|--------------|
| Potência nominal          | 150 [kW]     |
| Rendimento global         | 0,85         |
| $\dot{m}_{\text{comb}}$   | 14,77 [kg/h] |
| PCI do combustível        | 43 [MJ/kg]   |
| Potência elétrica nominal | 67,1 [kW]    |
| Potência térmica nominal  | 82,9 [kW]    |

O recuperador de calor dos gases de exaustão é um permutador de calor de carcaça e tubo sendo que o lado quente é correspondente aos gases de exaustão e o lado frio é correspondente ao da água de arrefecimento do motor. O seu valor para o coeficiente global de transferência de calor ( $U.A$ ) é igual a 20 [W/K].

#### 4.4.2 Modelo de simulação da UTA das Piscinas

Em relação à UTA das Piscinas, o sistema é praticamente idêntico ao da simulação das bombas de calor, apenas substituindo o *chiller* ou bomba de calor, por um *chiller* de absorção.

Assim, o esquema representado na Figura 4.27 mostra o princípio utilizado para a simulação desta componente.

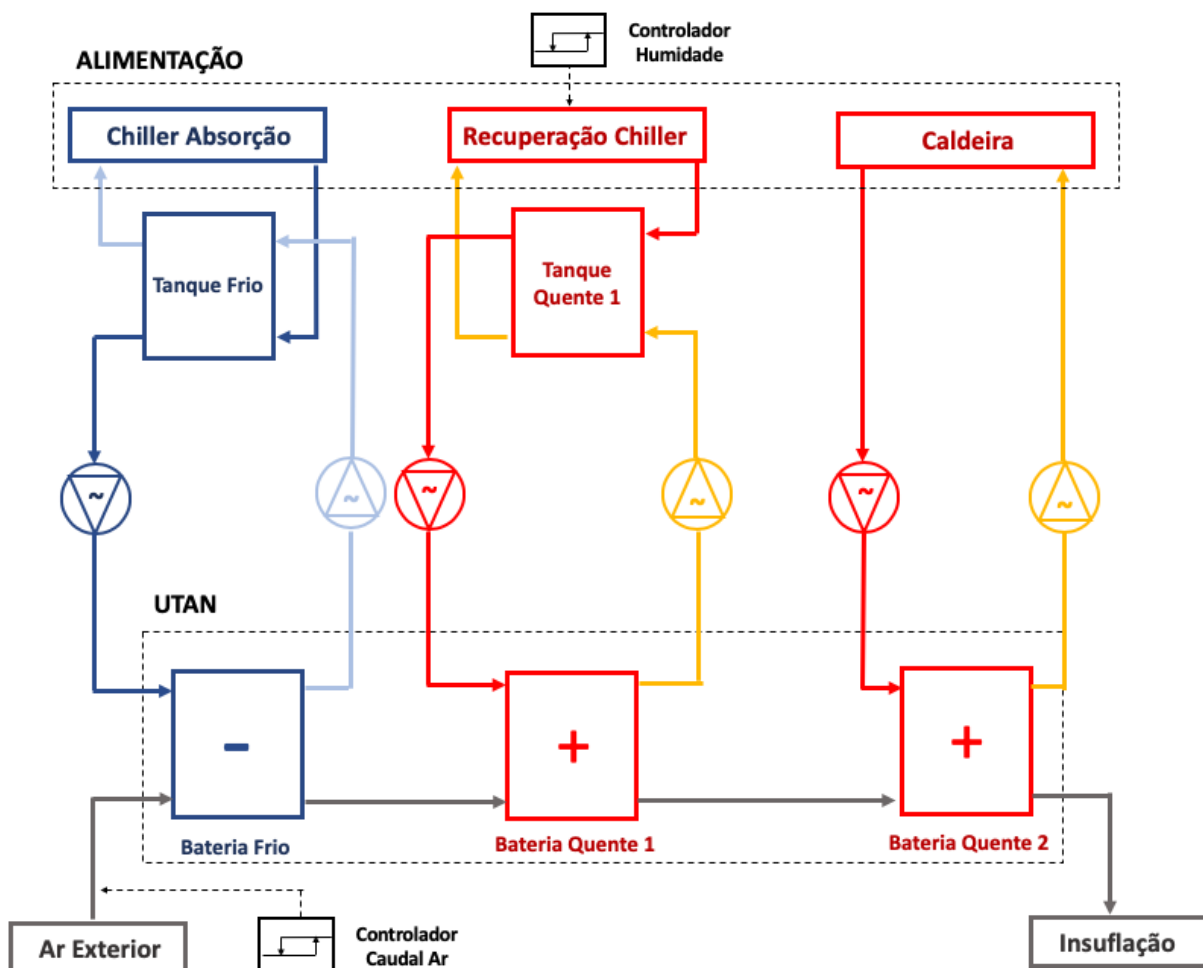


Figura 4.27: Esquema do conceito para a UTA das piscinas para a simulação da trigeriação.

Em relação aos componentes individuais, estes são exatamente iguais aos que já foram identificados nas secções 4.2.1 e 4.3.1, com exceção do *chiller* de absorção.



### 4.4.3 Modelo de simulação da climatização dos restantes espaços do edifício

A climatização dos espaços do edifício foi feita da mesma forma que na primeira simulação, sendo que o *chiller* fornece água fria para o arrefecimento, mas para o aquecimento, em vez da água quente ser fornecida pela caldeira, neste caso é, neste caso, fornecida pela recuperação do *chiller*, que para um *chiller* de absorção é mais quente, e neste caso, suficiente para vencer as necessidades térmicas de aquecimento associadas.

Assim, o aquecimento dos espaços é feito através da recuperação do *chiller* de absorção, tal como mostra o esquema da Figura 4.28.

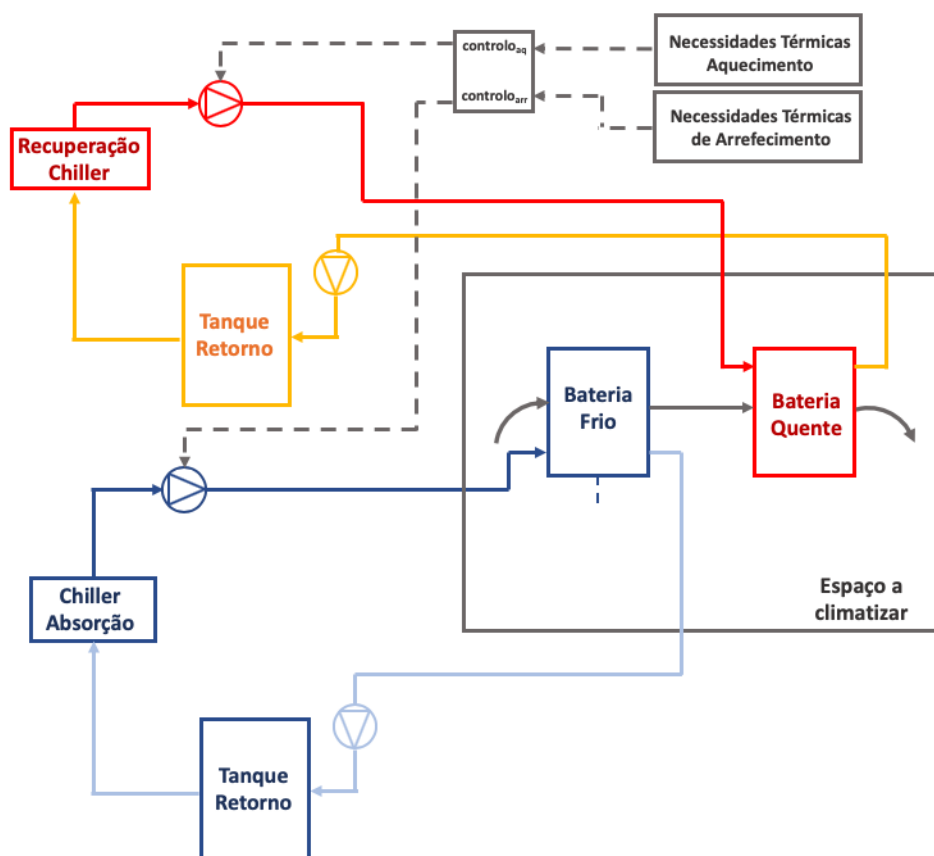


Figura 4.28: Representação esquemática do conceito da climatização dos espaços do edifício.

Quanto ao tratamento do ar, este foi realizado da mesma forma que a detalhada na secção 4.2.2.1, apenas com ar novo, pelo que não será elaborada.

A Figura 4.29 mostra um esquema de princípio para o sistema de tratamento do ar, que simplesmente substitui a caldeira pela recuperação do *chiller*. Note-se que para ter estas saídas todas do *chiller* foram utilizadas válvulas de divisão de caudal, elementos que não estão

representadas, neste caso.

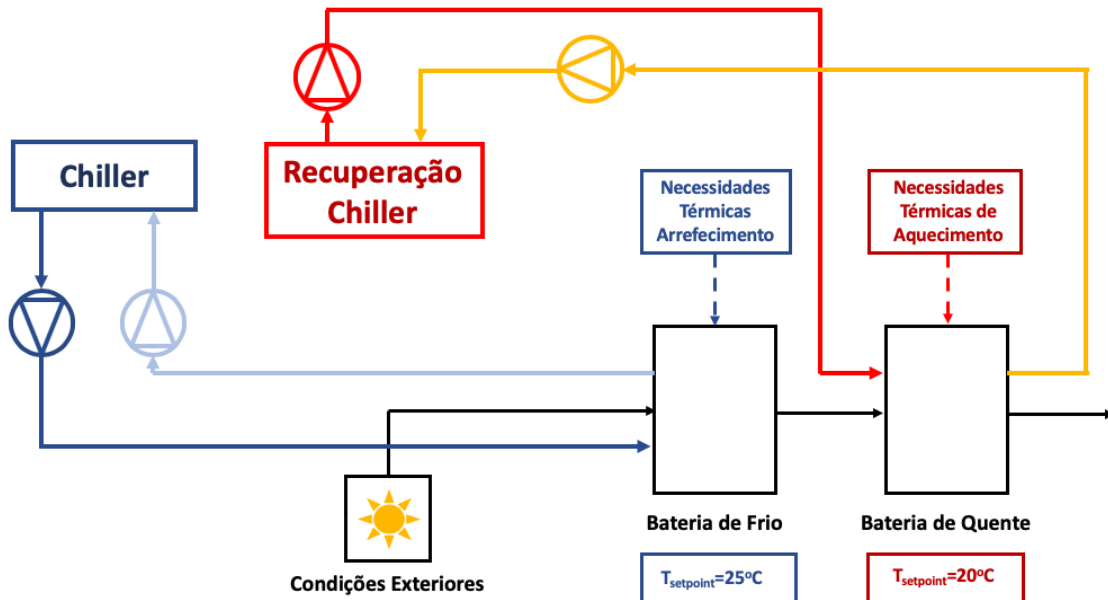


Figura 4.29: Representação esquemática do conceito do tratamento do ar dos espaços para a simulação da trigeiração.

#### 4.4.4 Modelo de simulação da instalação de coletores solares térmicos

A simulação da instalação dos coletores solares térmicos para produção de água quente foi igual às anteriores, e foi detalhada na secção 4.2.3, pelo que não será desenvolvida.

#### 4.4.5 Modelo de simulação da produção de água quente para as piscinas e AQS

A produção de água quente e AQS foi assegurada, em parte pela água quente proveniente do MCI, e auxiliada por uma caldeira. Em termos de sistema, este assemelha-se aos que foram apresentados anteriormente, apenas com esta alteração. Para isso, foi necessário um controlador que verifique se a temperatura à saída dos tanques de água quente, para que estes estejam à temperatura necessária (cerca de  $90^{\circ}\text{C}$ ). A Figura 4.30 mostra um esquema simplificado da montagem para a produção de água quente para o AQS e para as piscinas.

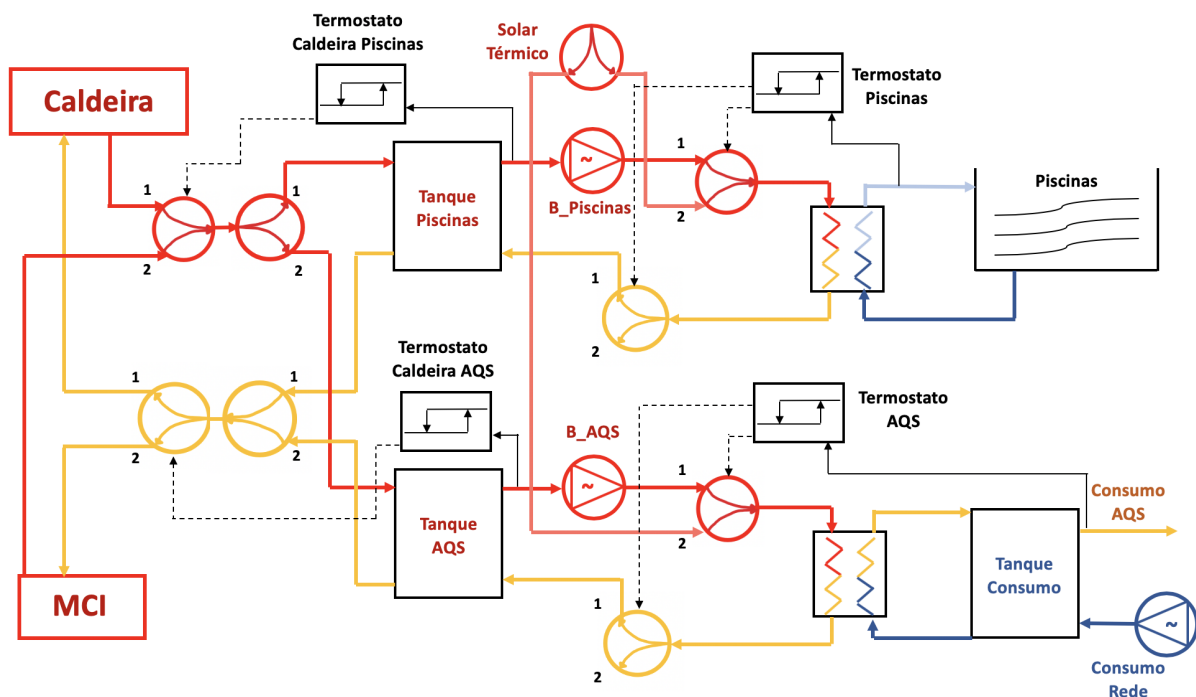


Figura 4.30: Esquema do conceito do sistema montagem para o consumo de AQS e das piscinas para a simulação da trigeação.

O controlador tem que dar prioridade ao MCI, por ser energia disponível no sistema, para não gastar a energia da caldeira quando esta não é necessária. As válvulas, tanto de separação de caudal, como de mistura no TRNSYS, quando o sinal de controlo é igual a 1 passa apenas o caudal na via 2, e quando este é 0, passa o caudal na via 1. Para simplificar o processo, estes controladores são termostatos, pelo que são apenas controladores ON/OFF.

Assim sendo, as variáveis de controlo (que são iguais) são determinadas de acordo com as Tabelas 4.29 e 4.30, em que a variável  $T_{tanque\_p}$  corresponde à temperatura à saída do tanque das piscinas, e a variável  $T_{tanque\_a}$  corresponde à temperatura à saída do tanque do AQS.

Tabela 4.29: Características de *output* do controlador da caldeira do circuito das piscinas para a produção de água quente para AQS e Piscinas

| Condições                                      | <i>Output</i> |
|--|---------------|
| $T_{tanque\_p} \leq 75 \text{ }^\circ\text{C}$ | 0             |
| $T_{tanque\_p} \geq 75 \text{ }^\circ\text{C}$ | 1             |

Tabela 4.30: Características de *output* do controlador da caldeira do circuito do AQS para a produção de água quente para AQS e Piscinas

| Condições  | <i>Output</i> |
|--|---------------|
| $T_{tanque\_a} \leq 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | 0             |
| $T_{tanque\_a} \geq 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | 1             |

As restantes componentes deste sistema são idênticas às que foram detalhadas nas secções [4.2.4](#) e [4.3.4](#).

# Capítulo 5

## Análise e Discussão dos resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para cada uma das simulações, assim como uma análise aos consumos gerais para cada sistema. Numa primeira fase tentou-se aferir o comportamento do modelo face ao tipo de sistema em análise. Depois, apresentam-se os resultados obtidos pela simulação dos diferentes componentes para uma melhoria da avaliação do desempenho do modelo e do próprio sistema. Estes resultados foram, posteriormente, comparados de forma a determinar se algum dos sistemas energéticos apresenta melhorias face ao clássico.

### 5.1 Resultados da Simulação do Sistema Clássico

#### 5.1.1 Resultados obtidos na simulação no TRNSYS

Para este sistema, o objetivo foi aproximar o projeto realizado inicialmente.

Começando pela UTA, o objetivo principal foi insuflar o ar nas condições de *setpoint*, ou seja, a uma temperatura de 35°C e uma humidade absoluta de 11 g/kg<sub>ar seco</sub>. A Figura 5.1 mostra os resultados obtidos para as várias temperaturas que traduzem as diferentes evoluções do ar dentro da UTA do sistema clássico, a Figura 5.2 mostra a temperatura à saída da caldeira e a do tanque correspondente, e a Figura 5.3 mostra as humidades absolutas nos vários pontos da UTA.

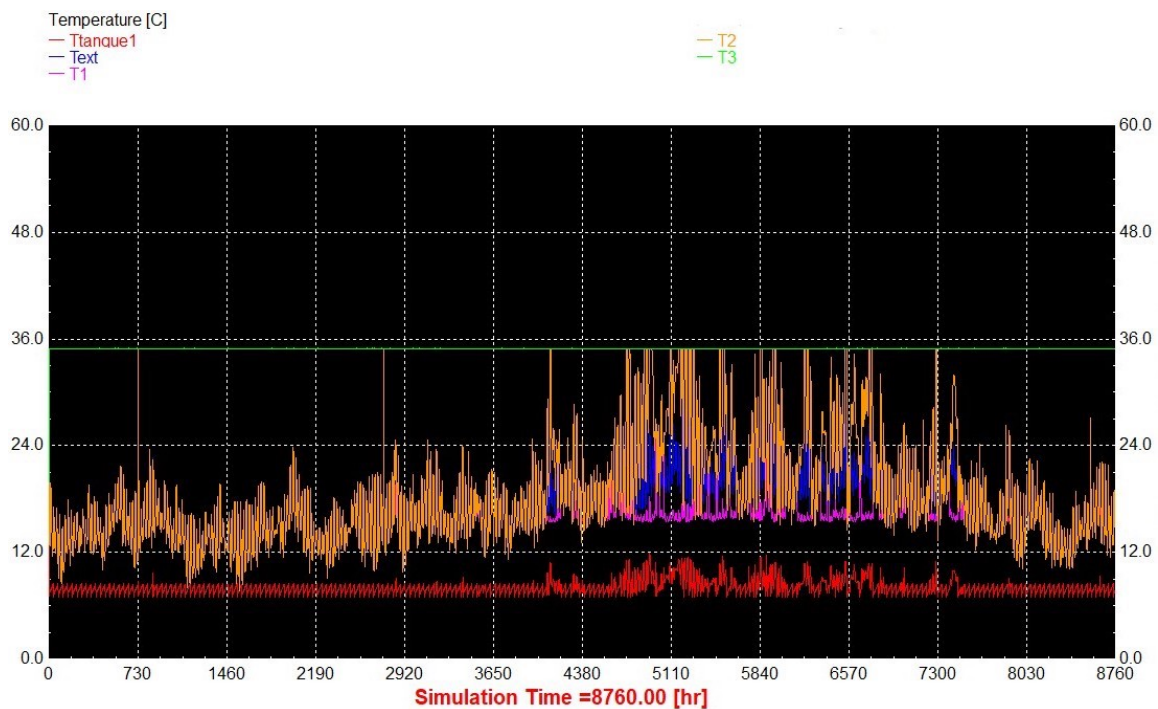


Figura 5.1: Gráfico das temperaturas envolvidas na UTA da simulação do sistema clássico, em [°C].

É possível verificar que o *chiller* liga e desliga consoante as necessidades e a temperatura do tanque correspondente (*Ttanque1*), o que comprova que o controlo feito no *chiller* está a funcionar.

Outra característica possível a destacar é a temperatura à saída da primeira bateria de quente (*T2*) ser igual à temperatura exterior quando não há necessidades de desumidificação, ou seja, o *chiller* não está a funcionar na sua potência máxima, mas a partir da hora 4000, quando começa a haver necessidades de desumidificação, tanto a temperatura *Ttanque1*, como a temperatura *T2* começam a oscilar mais, e a *T2* por vezes chega a atingir os 35°C.

A temperatura *T3* corresponde à temperatura à saída da segunda bateria de quente, ou seja, é a temperatura de insuflação. Nota-se que é possível manter esta temperatura sempre a 35°C, por isso, as máquinas estão bem dimensionadas.

Concernindo a caldeira, verifica-se as temperaturas correspondentes à saída desta, e à do tanque da caldeira (*Tcaldeira* e *Ttanque3*) e verifica-se que estas se encontram entre os 75°C e os 90°C, tal como esperado.

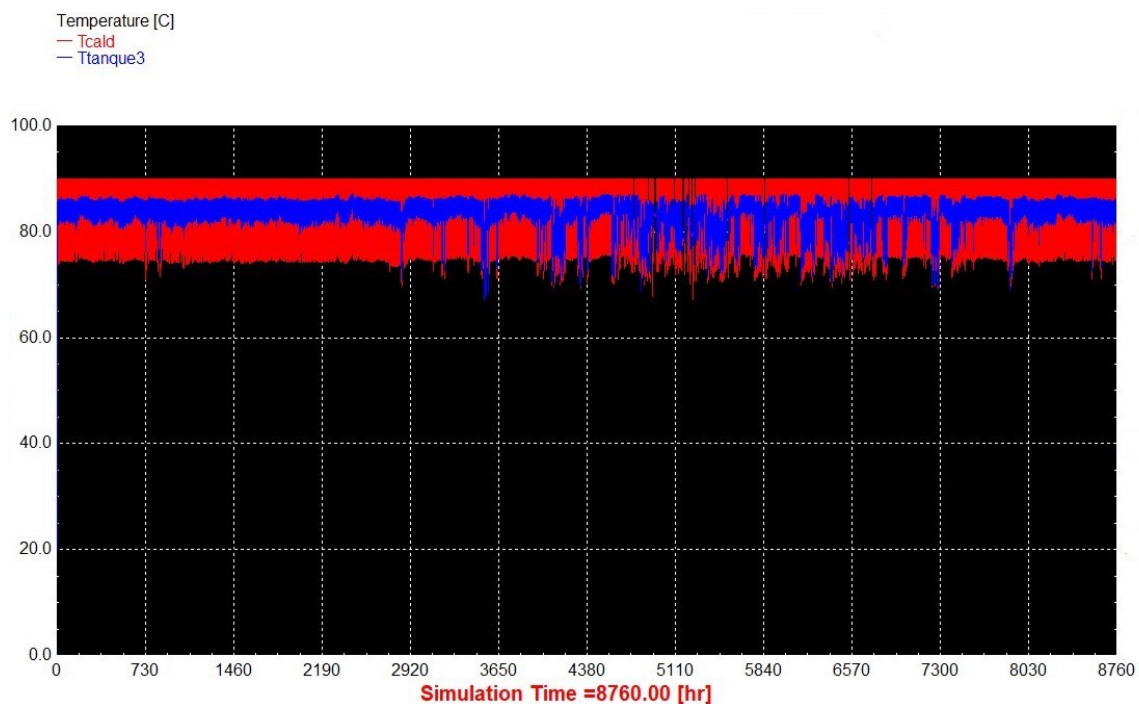


Figura 5.2: Gráfico das temperaturas associadas à caldeira da simulação do sistema clássico, em [°C].

No caso das humidades absolutas, na Figura 5.3 é possível verificar que quando a humidade absoluta do ar exterior ( $\omega_{\text{ext}}$ ) ultrapassa os 11 g/kg<sub>ar seco</sub>, a desumidificação entra em efeito e mantém a humidade relativa à saída da segunda bateria de quente ( $\omega_3$ ) mantém-se nos 11 g/kg<sub>ar seco</sub>, exceto em alguns casos pontuais em que atinge os 12 g/kg<sub>ar seco</sub>, o que não é preocupante para uma piscina. O valores de  $\omega_1$  e  $\omega_2$ , correspondendo aos valores da humidade absoluta à saída das baterias de frio e da primeira bateria de quente são iguais ao de  $\omega_3$ , pelo que não são perceptíveis no gráfico. Apenas a bateria de frio permite a desumidificação.

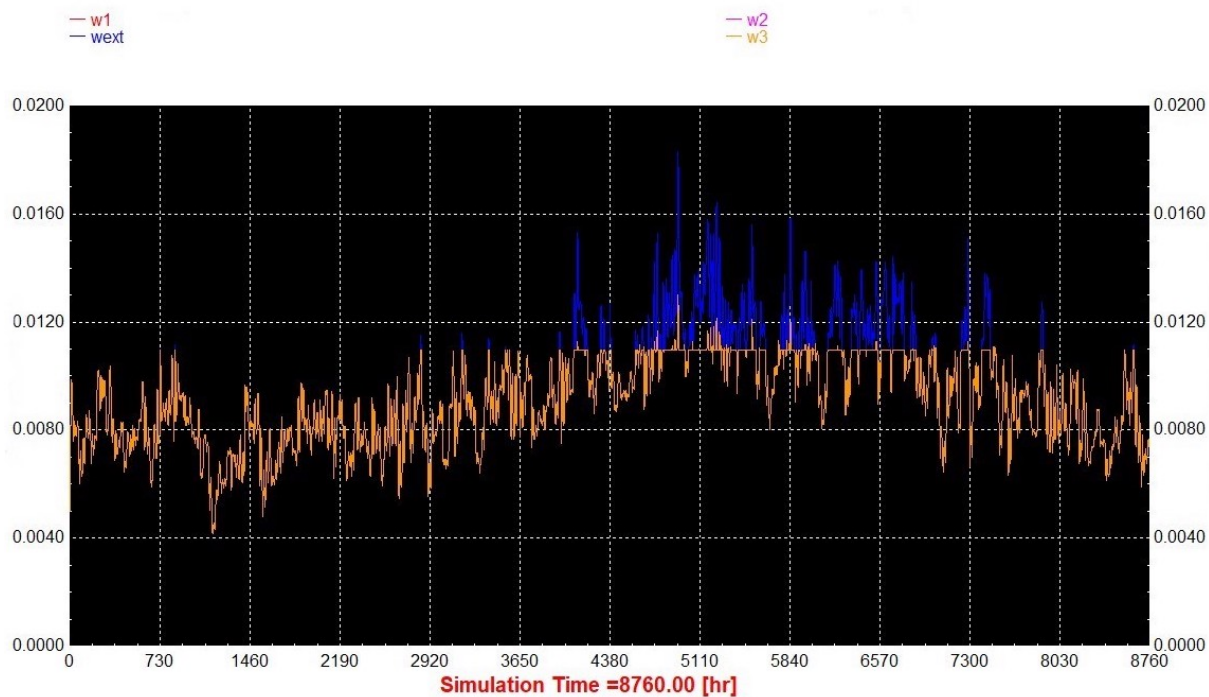


Figura 5.3: Gráfico das humidades absolutas envolvidas na UTA da simulação do sistema clássico, em  $[kg/kg_{ar\ seco}]$ .

Passando para a climatização dos espaços, a Figura 5.4 mostra as temperaturas à saída das baterias de quente e de frio para a climatização dos espaços.



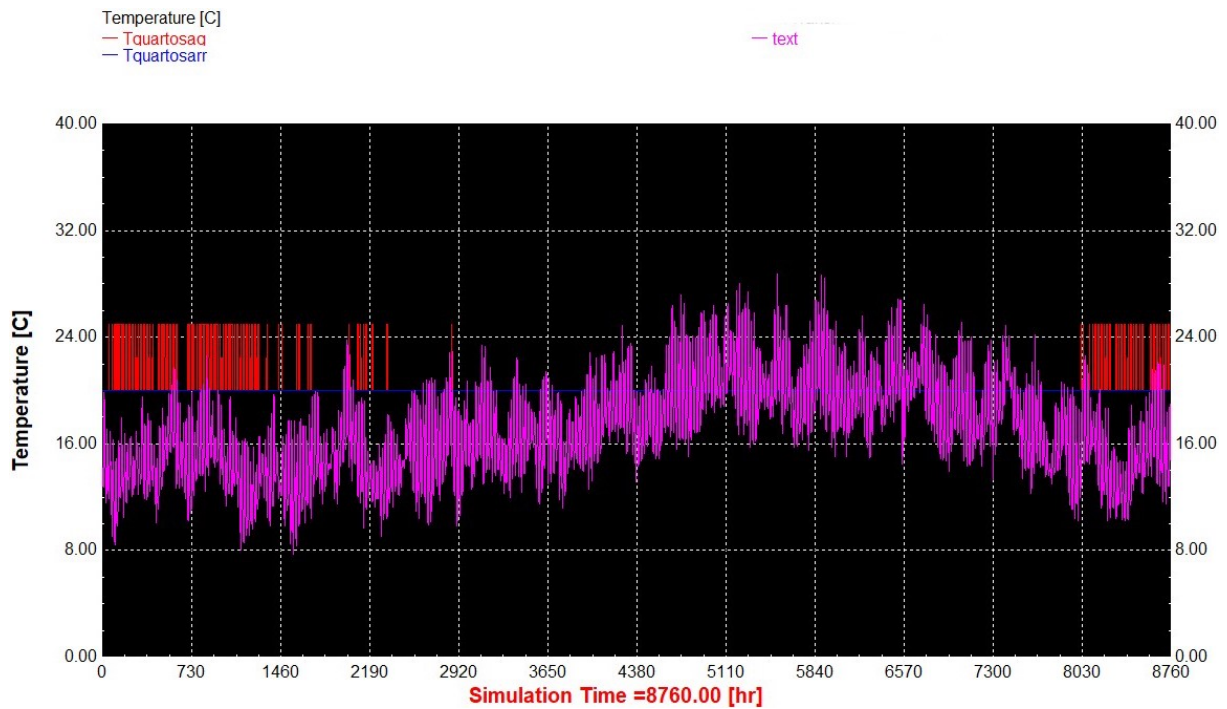


Figura 5.4: Gráfico das temperaturas da climatização dos espaços da simulação do sistema clássico, em [°C].

Como é possível reparar, quando existem cargas térmicas de aquecimento, o que corresponde a uma temperatura exterior baixa, à saída da bateria de quente o ar sai a 25°C, se não, sai a 20°C, sendo que existem cargas de arrefecimento durante o tempo restante. Estes dados estão de acordo com o que foi preconizado na secção 4.2.2.

Quanto à produção de água quente via coletores solares térmicos, as Figuras 5.5 e 5.6 mostram as temperaturas envolvidas nesta componente da simulação. A Figura 5.5 mostra apenas a temperatura à saída dos coletores, enquanto que a Figura 5.6 mostra as temperaturas de serviço para integrarem o sistema de produção de AQS e água quente das piscinas.

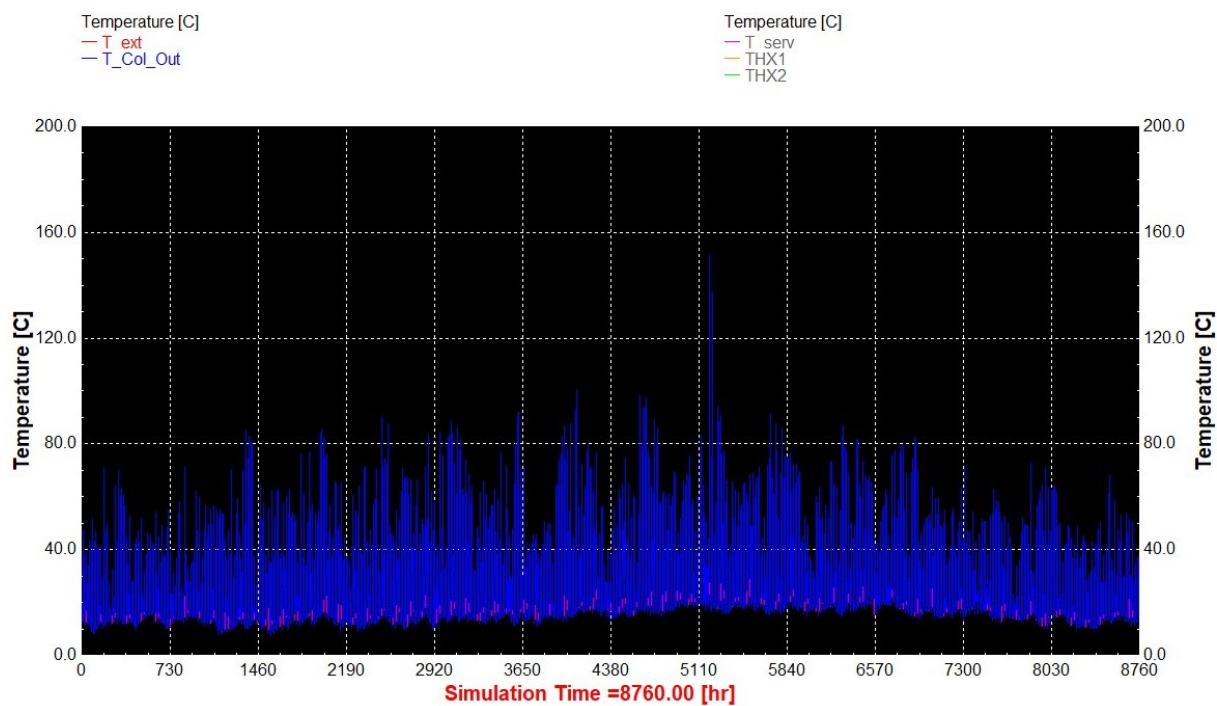


Figura 5.5: Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente pelo sistema solar térmico (1/2), em [°C].

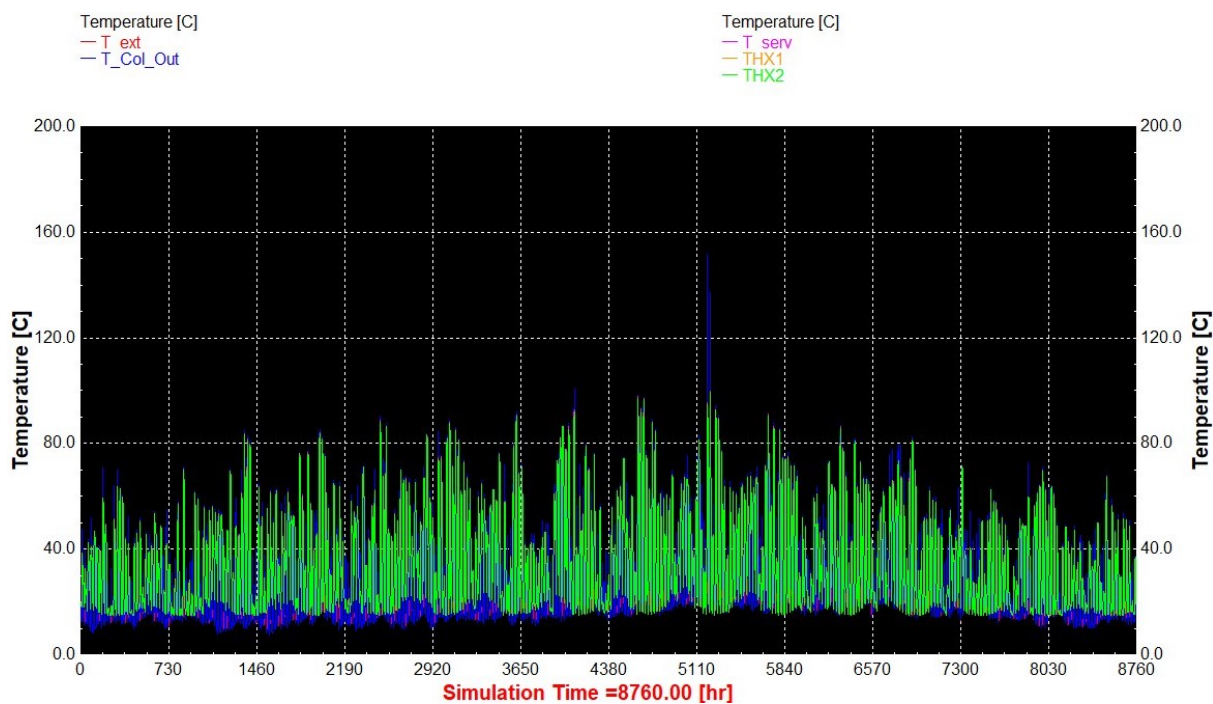


Figura 5.6: Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente pelo sistema solar térmico (2/2), em [°C].

Os coletores solares permitem aquecer a água, por vezes, até temperaturas bastante altas. Existe um valor apenas que está fora do contexto, em que a água quente chegou aos 150°C, mas isto pode ser devido à água ter ficado retida nos coletores durante uma altura de menor consumo, dando um erro de simulação. Porém, nas temperaturas de serviço, que são as temperaturas que vão seguir para a outra componente de simulação, isso já não acontece. Como foi visto na secção 4.2.3, graças ao tanque de inércia, as temperaturas não tomam valores extremos.

Por fim, em relação à produção de água quente para AQS e para as piscinas, as Figuras 5.7 e 5.8 mostram as temperaturas envolvidas nesta componente da simulação. A Figura 5.7 mostra a temperatura de serviço do AQS ( $T_{aq_s}$ ) e das piscinas ( $T_{pisc}$ ), e a Figura 5.8 mostra a temperatura de retorno à caldeira ( $T_{boiler\_in}$ ), assim como as temperaturas do permutador de calor do AQS com o tanque de consumo ( $THX_{in}$  e  $THX_{out}$ ). Estas temperaturas servem de controlo para saber se o sistema está a funcionar corretamente em todas as componentes, caso a temperatura do AQS ( $T_{aq_s}$ ) na Figura 5.7 estivesse errada.

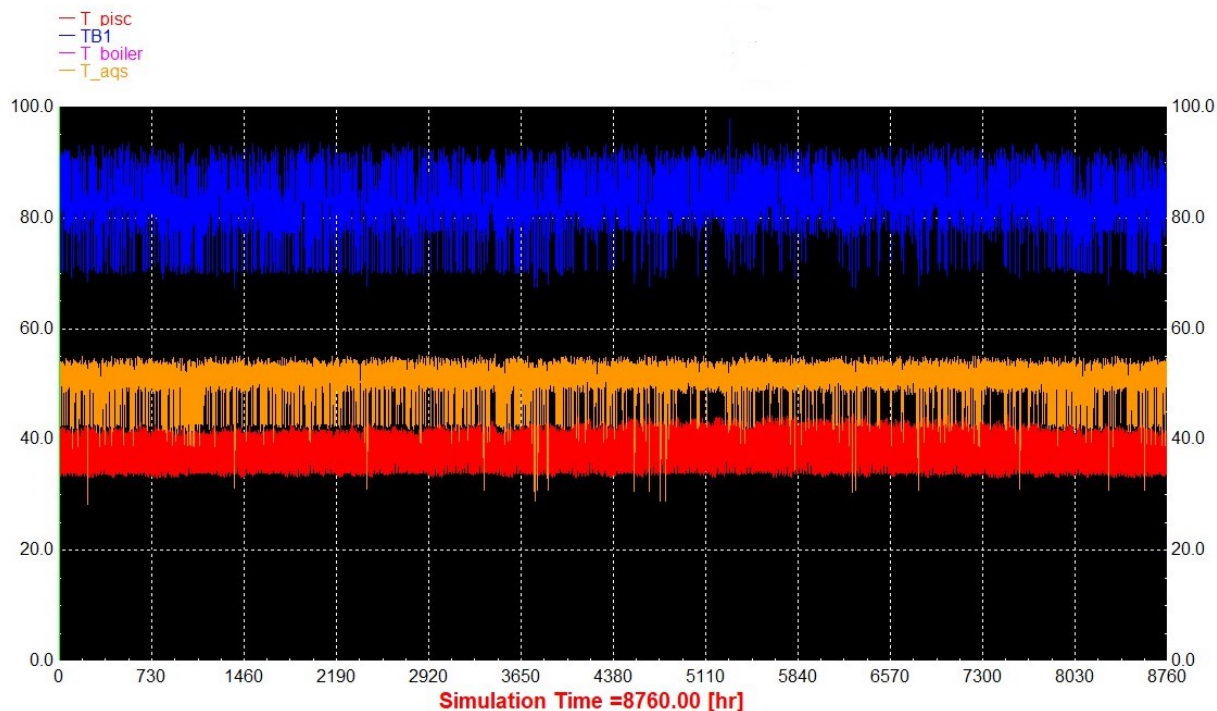


Figura 5.7: Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema clássico (1/2), em [°C].

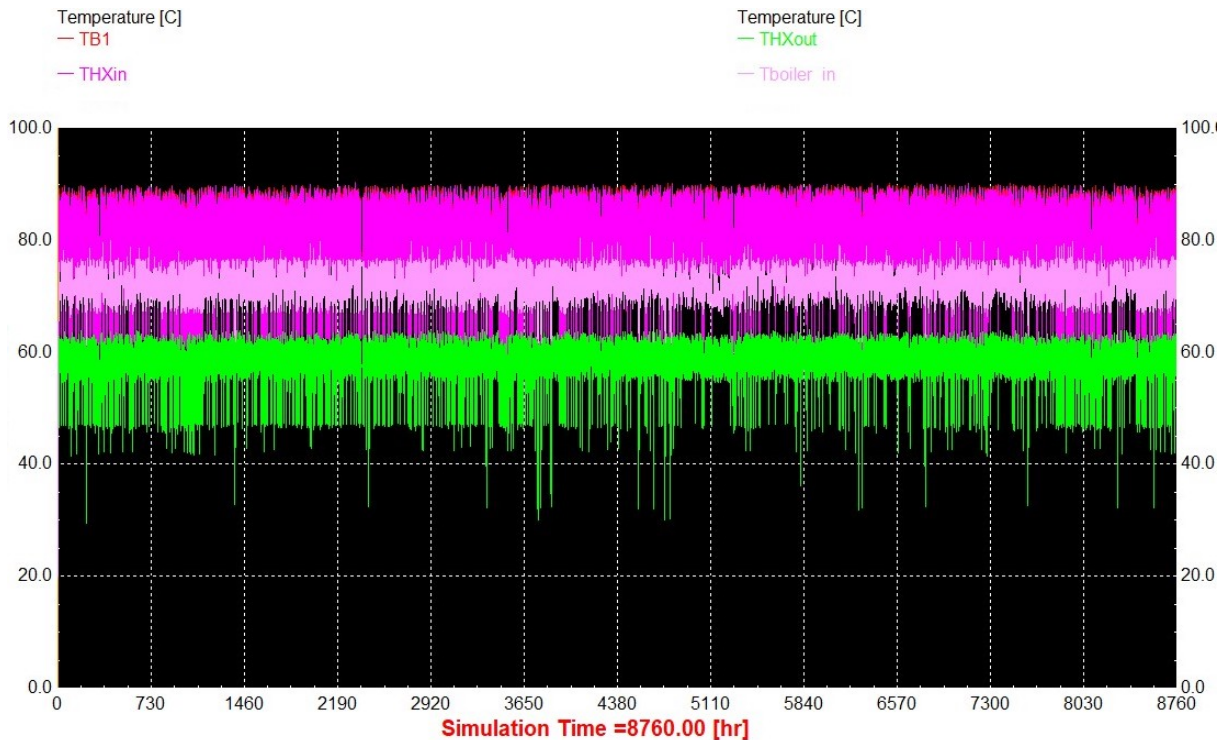


Figura 5.8: Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema clássico (2/2), em [°C].

Apesar das variações, a  $T_{aqc}$  encontra-se entre os 45°C e os 60°C, tal como pretendido, assim como a  $T_{pisc}$  que se encontra entre os 34°C e os 40°C. Assim, o sistema é capaz de produzir água quente suficiente para manter as temperaturas desejadas para os consumos necessários. Em relação ao controlo presente na Figura 5.8, é de realçar que a temperatura de retorno da caldeira ( $T_{boiler\_in}$ ) nunca é superior a 80°C, o que é necessário para não danificar a caldeira que está dimensionada para produzir água a 90°C.

### 5.1.2 Consumos associados ao sistema clássico

Para calcular os consumos totais associados ao sistema energético, foram retirados do TRNSYS os consumos das máquinas introduzidas (*chiller*, caldeira, bombas, ventiladores) e foram acrescentados os consumos que já estavam determinados anteriormente para a eletricidade que não foram simulados (iluminação, equipamentos elétricos, e bombas dos equipamentos lúdicos). A distribuição percentual do consumo anual em energia final por equipamento encontra-se representada na Figura 5.9.

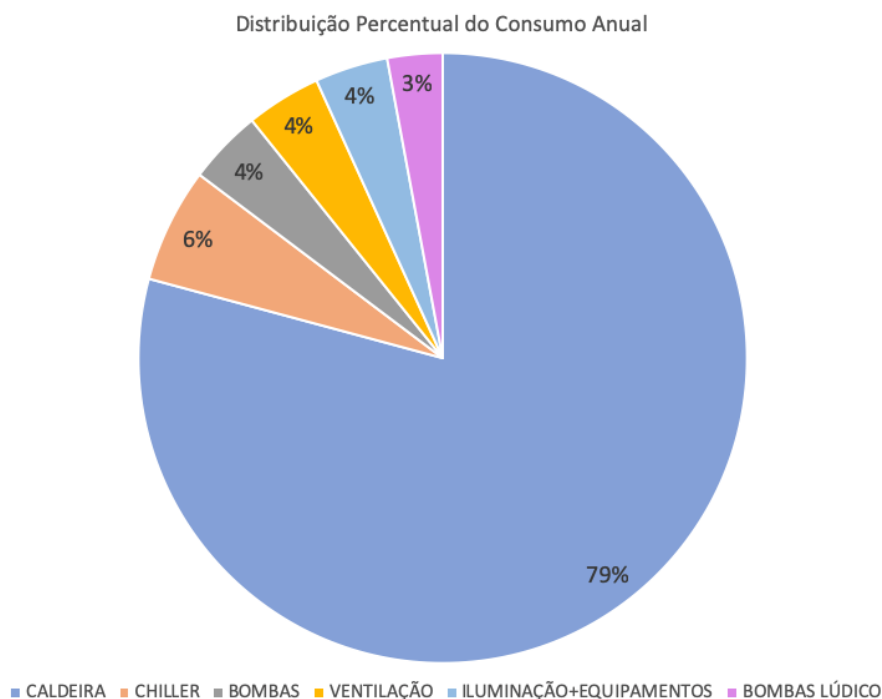


Figura 5.9: Distribuição do consumo anual de energia final por equipamento para a simulação do sistema clássico, em (%).

A caldeira é dominante no consumo geral porque esta assegura a produção de água quente constantemente para o sistema de AQS e para as piscinas, o que consome muita energia. Em relação ao *chiller*, este consome muito menos energia porque, apesar de ser utilizado todo o ano (por haver cargas de arrefecimento sensíveis, dado o clima), estas cargas são muito menores que a potência necessária para aquecer um caudal enorme de água para as piscinas e AQS. As bombas dos equipamentos lúdicos representam uma grande fração do consumo geral, porque são as bombas dos jatos das piscinas, dos *jacuzzis*, etc... Nestas bombas circulam grandes caudais e funcionam todos os dias das 7h às 20h, pelo que consomem uma grande quantidade de energia. As distribuições horárias dos consumos para cada equipamento estão detalhadas no Anexo E.

Os consumos anuais, em [kWh/ano] estão descritos na Tabela 5.1

Tabela 5.1: Uso de energia final por equipamento para a simulação do sistema clássico em MWh/ano.

| Equipamento                         | Consumo [MWh/ano] |
|-------------------------------------|-------------------|
| Caldeira                            | 1939,3            |
| <i>Chiller</i>                      | 148,7             |
| Bombas de Circulação                | 96,8              |
| Ventilação                          | 97,5              |
| Iluminação e Equipamentos elétricos | 95                |
| Bombas Lúdico                       | 71,7              |
| Total                               | 2449,0            |

## 5.2 Resultados da Simulação do Sistema com Bombas de Calor

### 5.2.1 Resultados obtidos no *software* TRNSYS

Começando pela UTA, assim como na primeira simulação, o objetivo principal era insuflar o ar nas condições de *setpoint* a 35°C com uma humidade absoluta de 11 g/kg<sub>ar seco</sub>. A Figura 5.10 mostra o gráfico obtido no TRNSYS para as várias temperaturas envolvidas na UTA, e a Figura 5.11 mostra as humidades absolutas nos vários pontos da UTA.

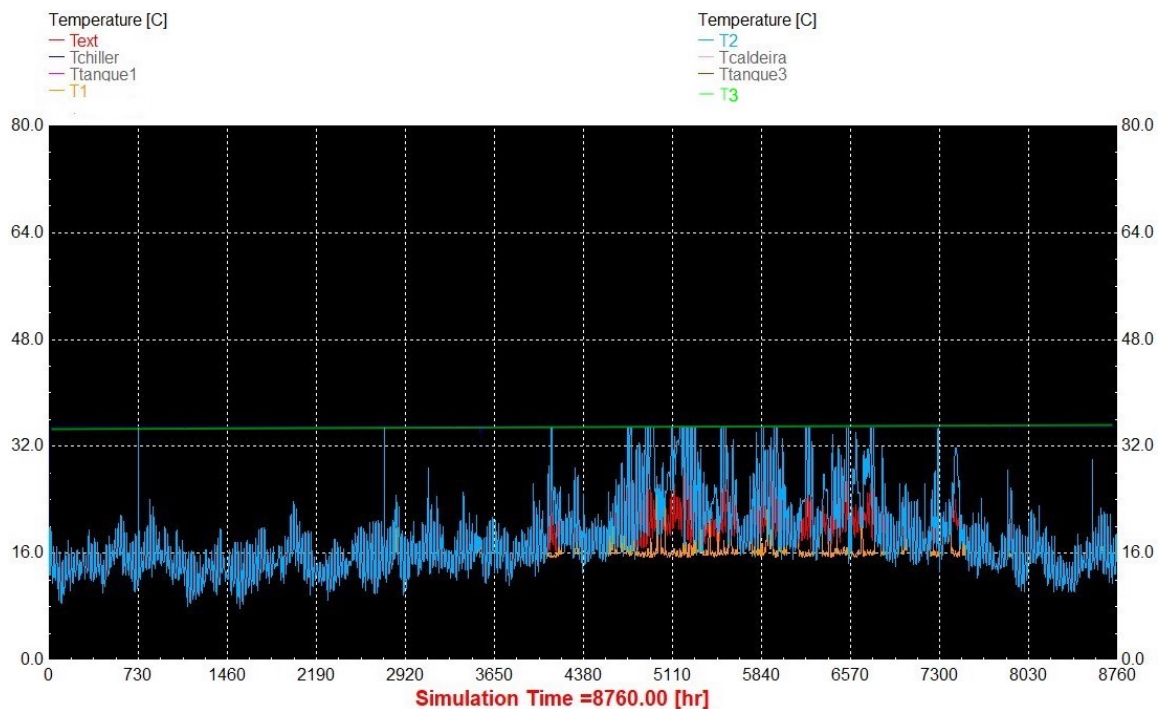


Figura 5.10: Gráfico das temperaturas envolvidas na UTA da simulação do sistema com bombas de calor, em [°C].

Como foi utilizado como sistema base o mesmo que na simulação apresentada na secção 5.1.1, neste gráfico não foi apresentada a temperatura da bomba de calor de ar nem do tanque frio, para uma melhor leitura. Foi utilizado um *chiller* como uma bomba de calor, por serem o mesmo tipo de máquina, apenas com umas adaptações nas características.

Na Figura 5.10 verifica-se que a temperatura à saída da primeira bateria de quente ( $T2$ ) é igual à temperatura exterior até haver necessidades de desumidificação. Tal como se verifica na Figura 5.11, a temperatura à saída da bateria de frio ( $T1$ ) é inferior à temperatura exterior, o que significa que a bomba de calor está em funcionamento. Porém, esta não produz água quente suficiente para elevar a temperatura  $T2$  aos 35°C, muito por causa do controlo efetuado na máquina. Para resolver o problema, foi ligada uma parte do sistema de produção de água quente para o AQS e para as piscinas que não era utilizada, à segunda bateria de quente, e verificou-se ser suficiente para manter a temperatura  $T3$  nos 35°C.

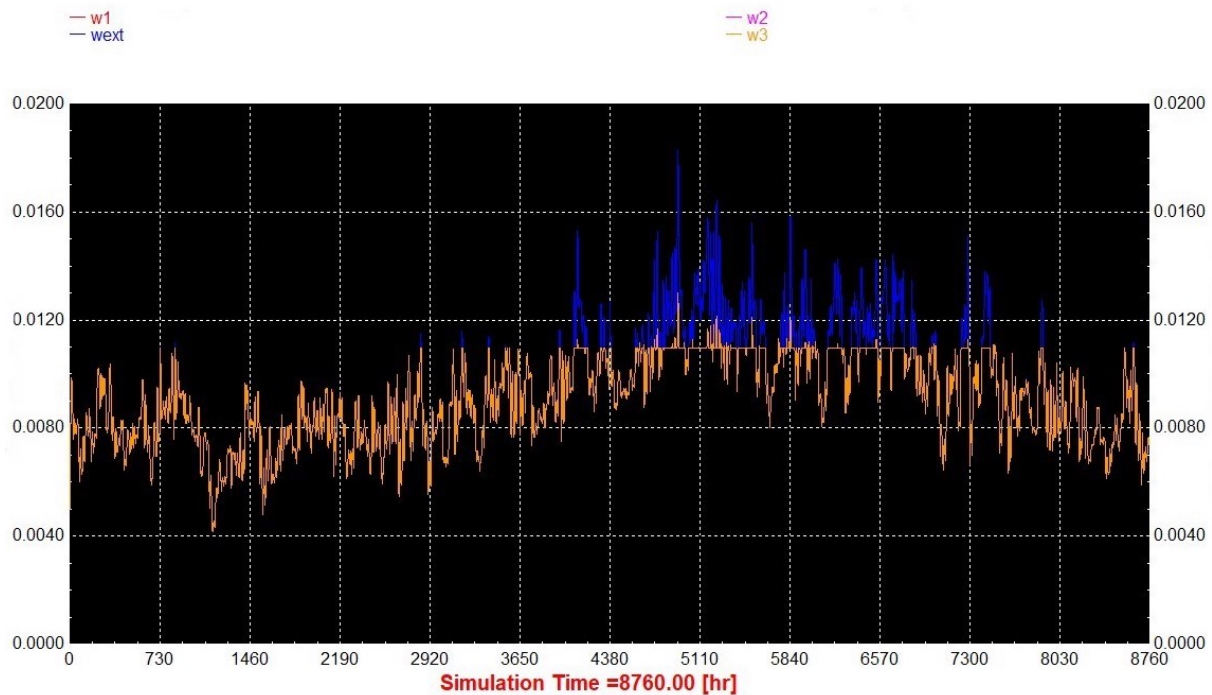


Figura 5.11: Gráfico das humidades absolutas envolvidas na UTA da simulação do sistema com bombas de calor, em [kg/kg<sub>ar seco</sub>].

Para as humidades absolutas, verifica-se novamente que  $\omega_3$ , que corresponde à humidade absoluta à saída da UTA não ultrapassa os 11 g/kg<sub>ar seco</sub> exceto em alguns casos em que a humidade exterior  $\omega_{ext}$  é muito elevada e a bomba de calor não tem potência suficiente para desumidificar o caudal total de ar, tal como se observa na Figura 5.11. Porém, este resultado é satisfatório pois  $\omega_3$  atinge, no máximo (e pontualmente) 12,5 g/kg<sub>ar seco</sub>, o que para uma piscina é aceitável.

Passando para a climatização dos espaços, esta foi conseguida através de uma bomba de calor água-água, que produz água quente e fria para vencer as cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento dos espaços. A Figura 5.12 mostra as temperaturas de insuflação para o aquecimento e para o arrefecimento.



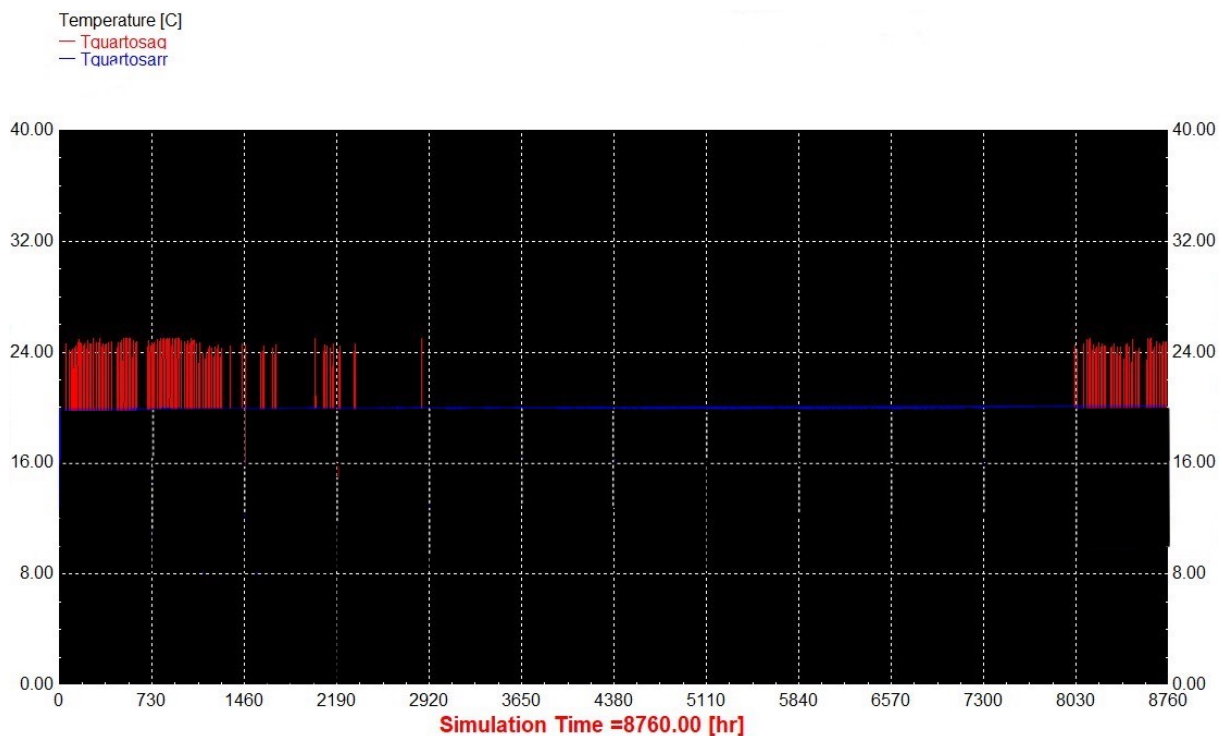


Figura 5.12: Gráfico das temperaturas da climatização dos espaços da simulação do sistema com bombas de calor.

Tal como simulação anterior, foi possível identificar a existência de cargas térmicas de aquecimento no inverno, e é nesse momento que o ar é insuflado a 25°C. Ao contrário da simulação anterior, nesta, as condições de *setpoint* dos 25°C não são sempre atingidas, havendo ligeiras variações, situação facilmente explicável, uma vez que se utilizam tanques de inércia e a bomba de calor está sujeita a várias variáveis de controlo que manipulam os caudais de circulação. Durante o resto do ano, a temperatura de insuflação é de 20°C. Relembre-se que este ar já foi tratado previamente na ventilação, e não é ar exterior, é apenas ar recirculado.

A produção de água quente com o sistema solar térmico é exatamente igual à apresentada na secção 5.1.1, pelo que não será desenvolvida.

Por fim, em relação à produção de água quente para AQS e para as piscinas, as Figuras 5.13 e 5.14 mostram as temperaturas envolvidas nesta componente da simulação. A Figura 5.13 evidencia a temperatura de serviço do AQS ( $T_{aq}$ ) e das piscinas ( $T_{pisc}$ ), e a Figura 5.14 mostra a temperatura de retorno à caldeira ( $T_{boiler\_in}$ ), assim como as temperaturas do permutador de calor do AQS com o tanque de consumo ( $THXin$  e  $THXout$ ). Assim, e tal como na secção 5.1.1 estas temperaturas servem de controlo para saber se o sistema está a funcionar corretamente em todas as componentes, caso a temperatura do AQS ( $T_{aq}$ ) na Figura 5.13 estivesse errada.

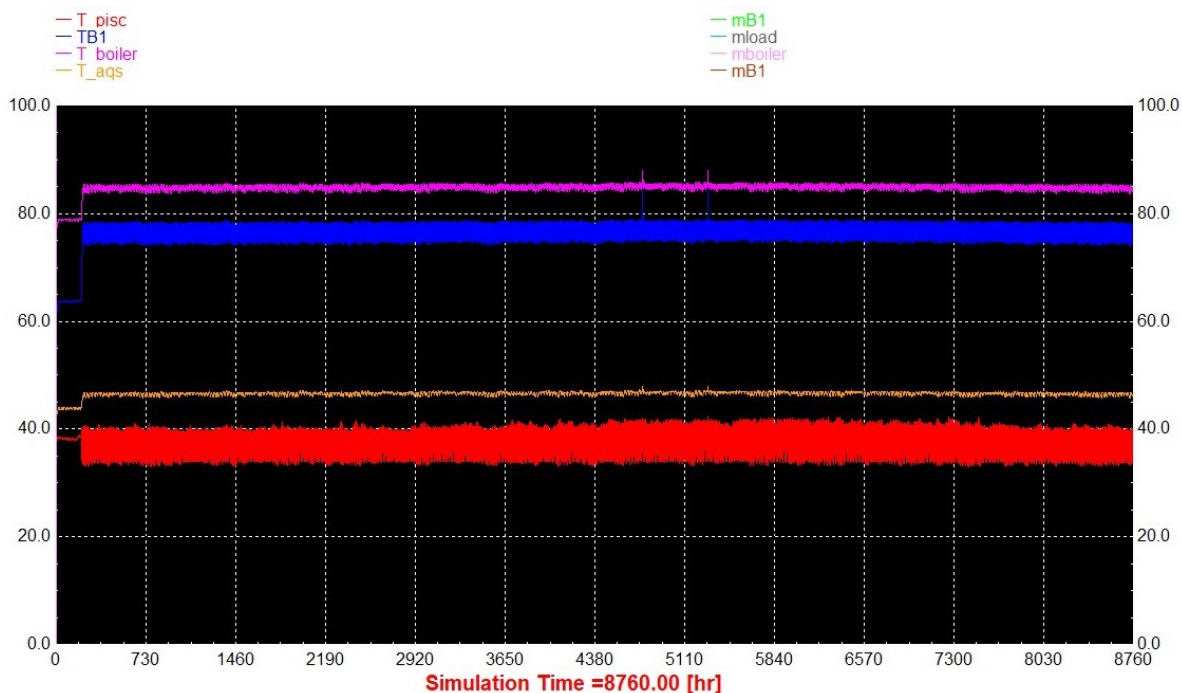


Figura 5.13: Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema com bombas de calor (1/2), em [°C].

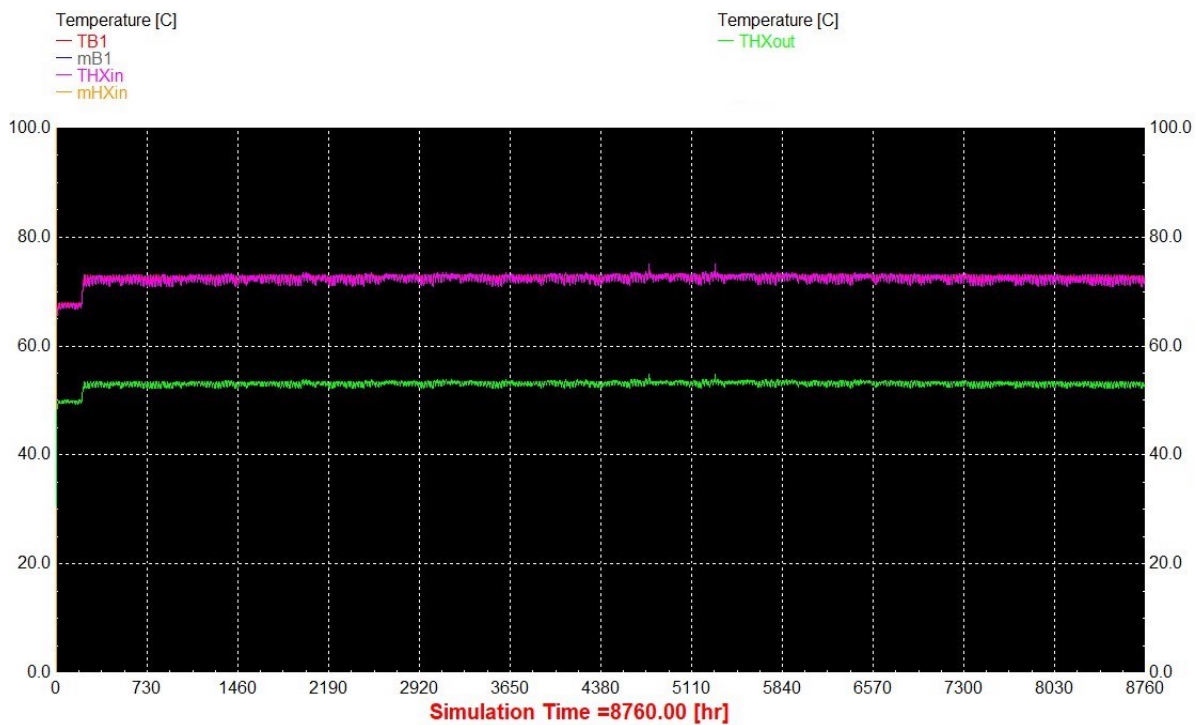


Figura 5.14: Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema com bombas de calor (2/2), em [°C].

Na Figura 5.13 é possível notar que a  $T_{aq_s}$  é próxima dos 47°C, o que é mais baixo do que a simulação anterior, mas tem muito menos variações, pelo facto da caldeira servir unicamente para este propósito. Como a variável de controlo do termostato do AQS foi determinada para estar entre 45°C e 60°C, encontra-se dentro dos parâmetros, mas se numa aplicação prática se desejar ter uma temperatura de AQS superior à apresentada, é necessário ajustar a variável de controlo, ou o caudal de água quente proveniente da caldeira, ou a sua potência. A  $T_{pisc}$  encontra-se, mais uma vez, entre os 35°C e 40°C, tal como pretendido.

Na Figura 5.14 é possível notar que a água quente entra no permutador de calor do AQS ( $THX_{in}$ ) a cerca de 73°C e sai a 53°C, com um  $\Delta T$  de 20°C para a troca de calor com a água do tanque do AQS que está mais fria porque tem água da rede introduzida a 15°C, permitindo, assim, uma temperatura  $T_{aq_s}$  de consumo final elevada o suficiente.

## 5.2.2 Consumos associados ao sistema das bombas de calor

Tal como na secção 5.1.2, para calcular os consumos totais associados ao sistema energético, foram retirados do TRNSYS os consumos das máquinas introduzidas (bombas de calor, caldeira, bombas de circulação, ventiladores) e foram acrescentados os consumos que já estavam determinados anteriormente para a eletricidade que não foram simulados (iluminação, equipamentos elétricos e bombas dos equipamentos lúdicos). A distribuição percentual do consumo anual em energia final por equipamento encontra-se representada na Figura 5.15.

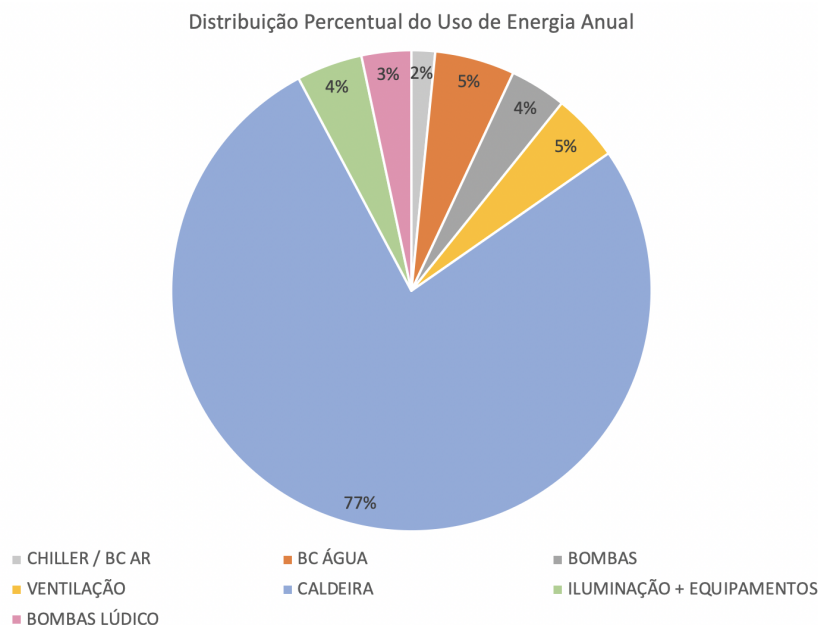


Figura 5.15: Distribuição em do consumo anual de energia final por equipamento para a simulação das bombas de calor (em %).

Os elementos "BC" correspondem às bombas de calor. É possível determinar, mais uma vez, que a caldeira domina os consumos energéticos desta instalação energética, mesmo sendo um equipamento auxiliar para a produção de água quente para AQS e para as piscinas. Como este processo envolve caudais muito elevados e dura o ano inteiro, e tem, por isso, elevados requisitos energético. A caldeira contribui, também, para aquecimento do ar das piscinas, que não é possível ser assegurado por nenhuma das bombas de calor. O consumo da bomba de calor ar-ar é extremamente reduzido porque esta apenas está ligada no período em que é necessário desumidificar o ar para as piscinas, ou seja, no verão. Em comparação, o consumo da bomba de calor água-água é relativamente elevado porque esta contribui tanto para o aquecimento, como para o arrefecimento dos espaços. A evolução do uso de energia de cada um dos elementos está descrita em detalhe no Anexo E.

Os consumos anuais, em [kWh/ano] estão descritos na Tabela 5.2

Tabela 5.2: Uso de energia anual de energia final por equipamento para a simulação do sistema clássico em kWh/ano.

| Equipamento                         | Consumo [MWh/ano] |
|-------------------------------------|-------------------|
| Caldeira                            | 1647,3            |
| Bomba de Calor Ar-Ar                | 34,1              |
| Bomba de Calor Água-Água            | 115,3             |
| Bombas de Circulação                | 81,3              |
| Ventilação                          | 97,5              |
| Iluminação e Equipamentos elétricos | 95,0              |
| Bombas Lúdico                       | 71,7              |
| Total                               | 2142,2            |

## 5.3 Resultados da Simulação do Sistema com Trigeração

### 5.3.1 Resultados obtidos no *software* TRNSYS

Começando pela unidade de cogeração, que alimenta o *chiller* de absorção e fornece calor para os outros elementos da simulação, o objetivo desta unidade foi a produção de água quente a cerca de 85°C.

A Figura 5.16 mostra a temperatura da água à entrada do tanque de inércia (a vermelho) e a temperatura à saída do tanque (a azul) - essa é a temperatura que irá para os outros elementos da simulação. A Figura 5.17 mostra a temperatura da água do arrefecimento do MCI que irá para o recuperador, e de seguida para o tanque, tal como foi explicado na secção 4.4.

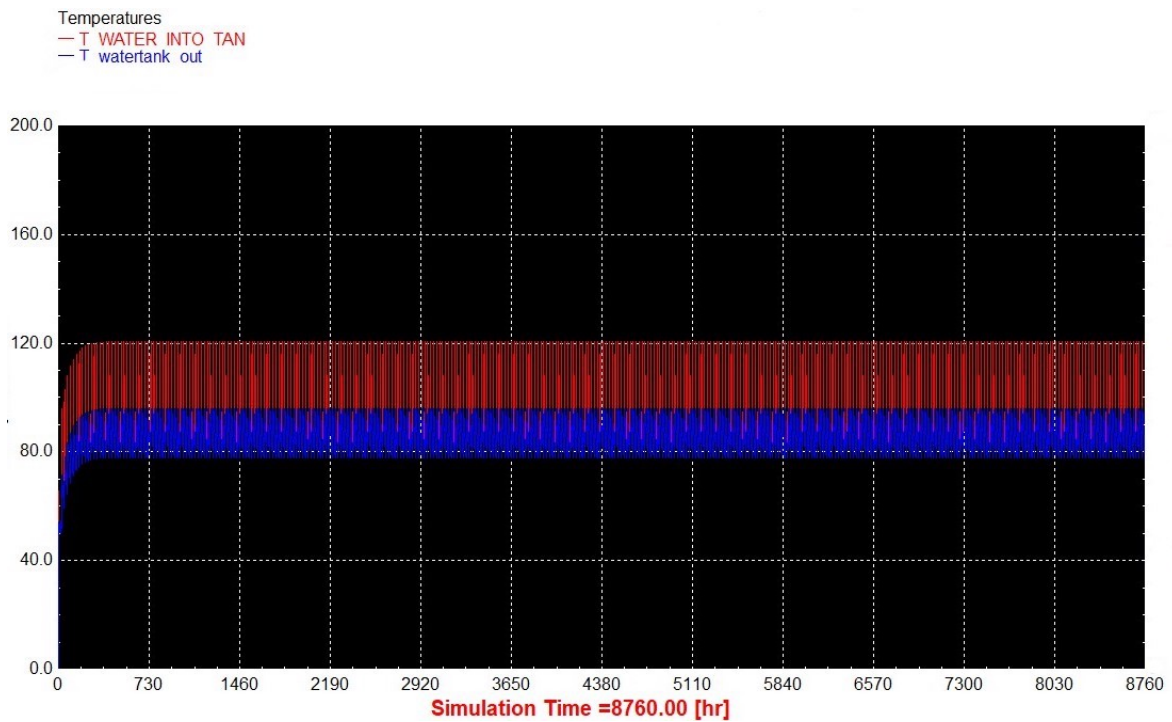


Figura 5.16: Gráfico das temperaturas à saída da unidade de cogeração na simulação com trigeiração (1/2), em [°C].

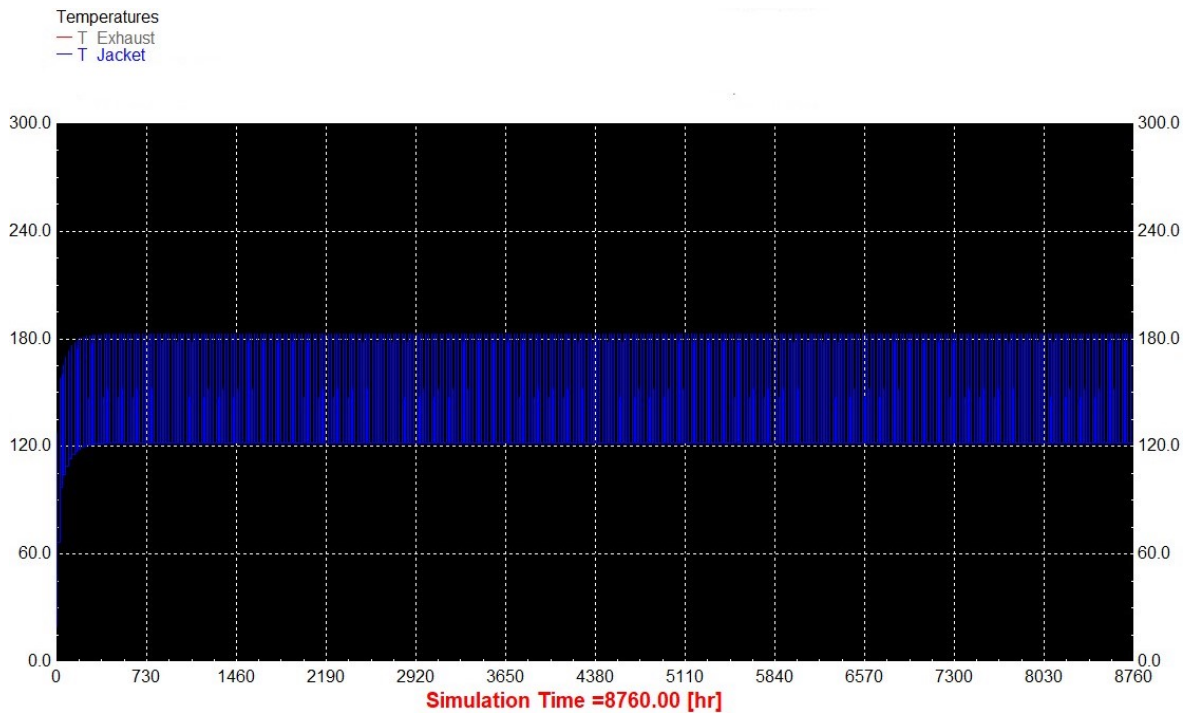


Figura 5.17: Gráfico das temperaturas à saída da unidade de cogeração na simulação com trigeiração (2/2), em [°C].

Como é possível verificar pela observação da Figura 5.17 a água de arrefecimento do MCI sai sob a forma de vapor, situação não é desejável para o funcionamento dos equipamentos. Contudo, após troca de calor com a água do tanque de inércia, a água à saída do tanque apresenta a temperatura desejada, entre os 80°C e os 90°C, como se verifica na Figura 5.16.

Em relação à UTA, assim como nas simulações anteriores, o objetivo continuou a ser insuflar o ar nas condições de *setpoint* estabelecidas. A Figura 5.18 apresenta o gráfico obtido no TRNSYS com as temperaturas envolvidas na UTA, e a Figura 5.19 representa a variação das humidades absolutas nos vários pontos da UTA.

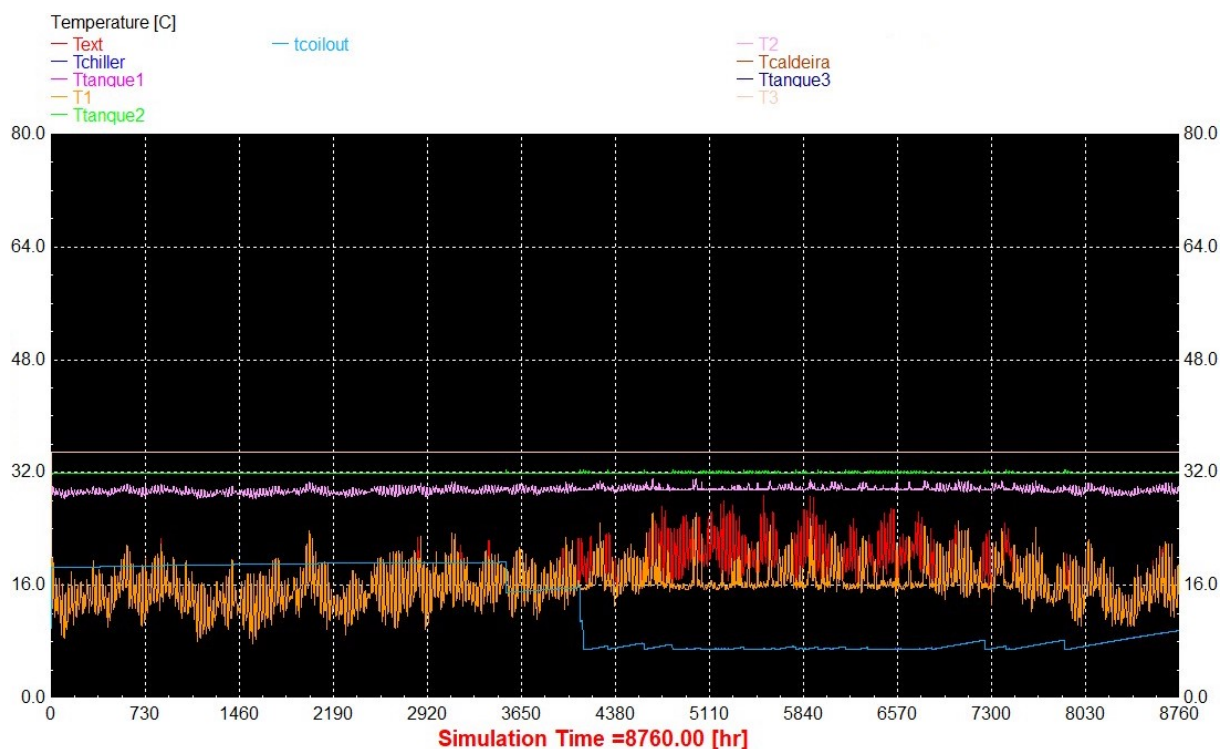


Figura 5.18: Gráfico das temperaturas envolvidas na UTA da simulação do sistema com trigeiração, em [°C].

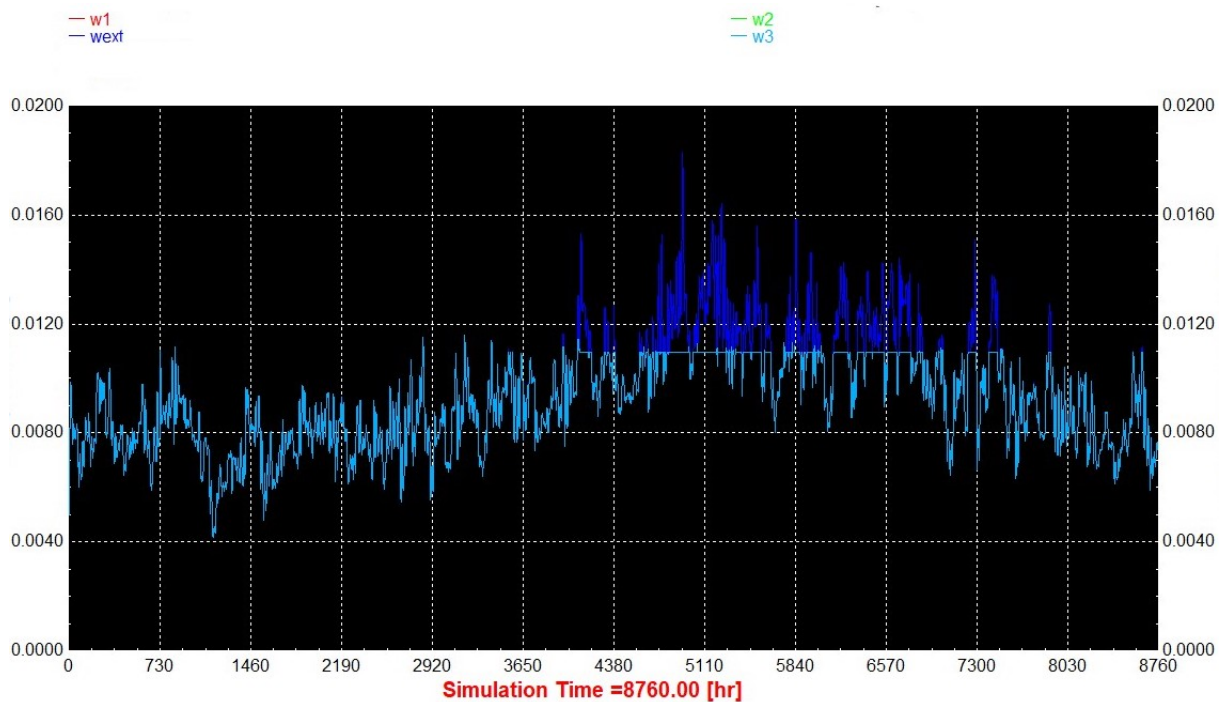


Figura 5.19: Gráfico das humidades absolutas envolvidas na UTA da simulação do sistema com trigeriação, em [kg/kg<sub>ar seco</sub>].

Pela observação da Figura 5.18 é possível verificar que a temperatura à saída da bateria de frio ( $T1$ ) é igual à temperatura exterior ( $T_{ext}$ ) até haver necessidades de desumidificação, evidenciadas na Figura 5.19. Quando existem estas necessidades, o *chiller* liga e arrefece a temperatura exterior até cerca 16°C. Esse momento é evidenciado, também, pela variável *tcou* que aparece a azul claro na Figura 5.18, que representa o fluido proveniente do *chiller* de absorção que passa na bateria de frio - quando está desligado encontra-se a cerca de 18°C, e no momento em que é necessário desumidificar o ar, a temperatura passa a ser cerca de 8°C.

É possível notar, também, que a temperatura à saída da primeira bateria de quente ( $T2$ ) se aproxima muito mais dos 35°C do que nas simulações anteriores, o que significa que a recuperação deste tipo de *chiller* é muito mais energética. A temperatura à saída da segunda bateria de quente ( $T3$ ) é constante nos 35°C como desejado, pelo que as condições de projeto estão satisfeitas a nível de temperatura.

Quanto à humidade absoluta, na Figura 5.19 é possível observar, mais uma vez, que a humidade absoluta à saída da segunda bateria de quente ( $\omega_3$ ) nunca ultrapassa os 11 g/kg<sub>ar seco</sub>. Nesta simulação não existem picos em que a humidade absoluta ultrapassa o valor de *setpoint* quando  $\omega_{ext}$  é muito elevado, o que significa que a potência do *chiller* fornecida à desumidificação é mais elevada, obtendo menos erros. Assim, as condições de projeto foram cumpridas.

Passando para a climatização dos espaços, esta é feita através do *chiller* de absorção e da sua recuperação, uma vez que esta tem potência suficiente, e as cargas térmicas de aquecimento para os espaços são pequenas. A Figura 5.20 ilustra as temperaturas à saída das baterias de quente e de frio para a climatização dos espaços.

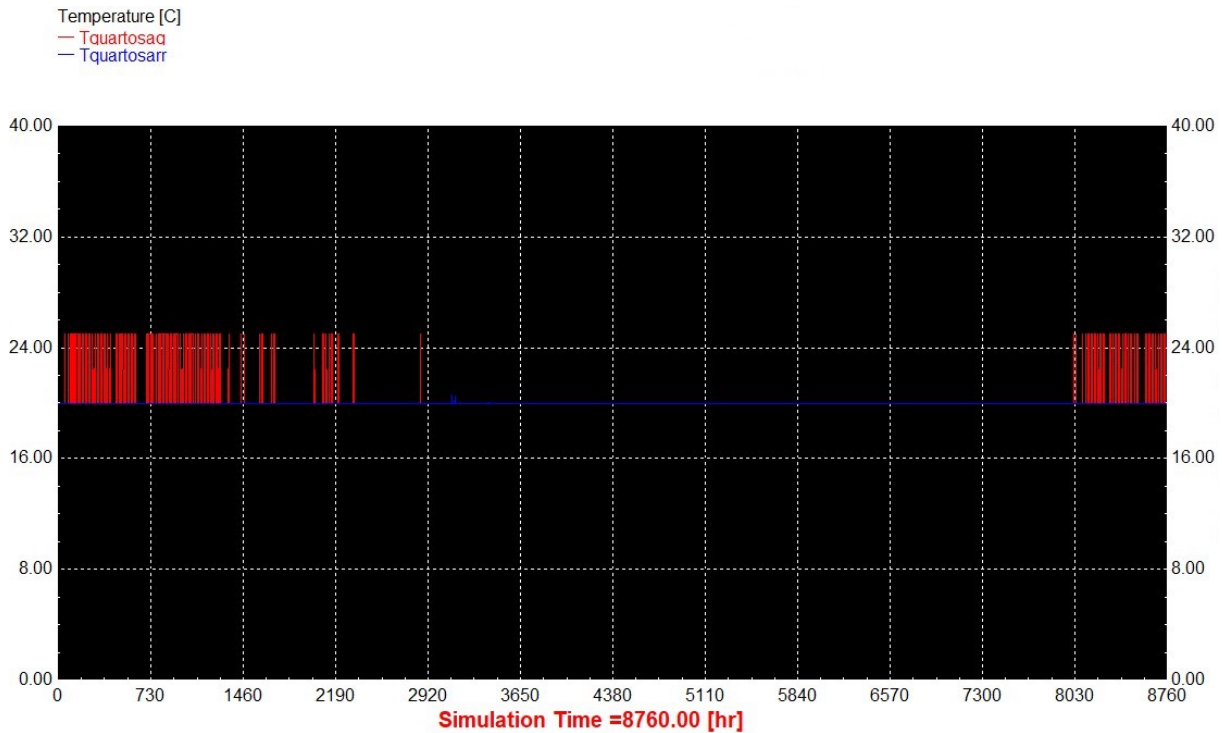


Figura 5.20: Gráfico das temperaturas da climatização dos espaços da simulação do sistema com trigeriação.

Tal como nas simulações anteriores, é possível observar que quando existem cargas térmicas de aquecimento, correspondente à altura do inverno, o ar é insuflado a 25°C ( $T_{quartosaq}$ ). Durante o resto do ano, porque existem cargas térmicas de arrefecimento, o ar é insuflado a 20°C ( $T_{quartosarr}$ ).

A produção de água quente com o sistema de solar térmico é exatamente igual à apresentada na secção 5.1.1, pelo que não será desenvolvida.

Por fim, em relação ao sistema de produção de água quente para o AQS e para as piscinas as Figuras 5.21 e 5.22 mostram as temperaturas envolvidas nesta componente da simulação. Assim, e tal como nas simulações anteriores, a Figura 5.21 mostra a temperatura de serviço do AQS ( $T_{aq_s}$ ) e das piscinas ( $T_{piscinas}$ ). A Figura 5.22 mostra a temperatura de retorno à caldeira ( $T_{boiler\_in}$ ), assim como as temperaturas antes depois do permutador de calor do AQS com o tanque de consumo ( $TH_{in}$  e  $TH_{out}$ ), de forma a aferir o funcionamento correto do sistema em todas as suas componentes, caso  $T_{aq_s}$  na Figura 5.21 estivesse errada.



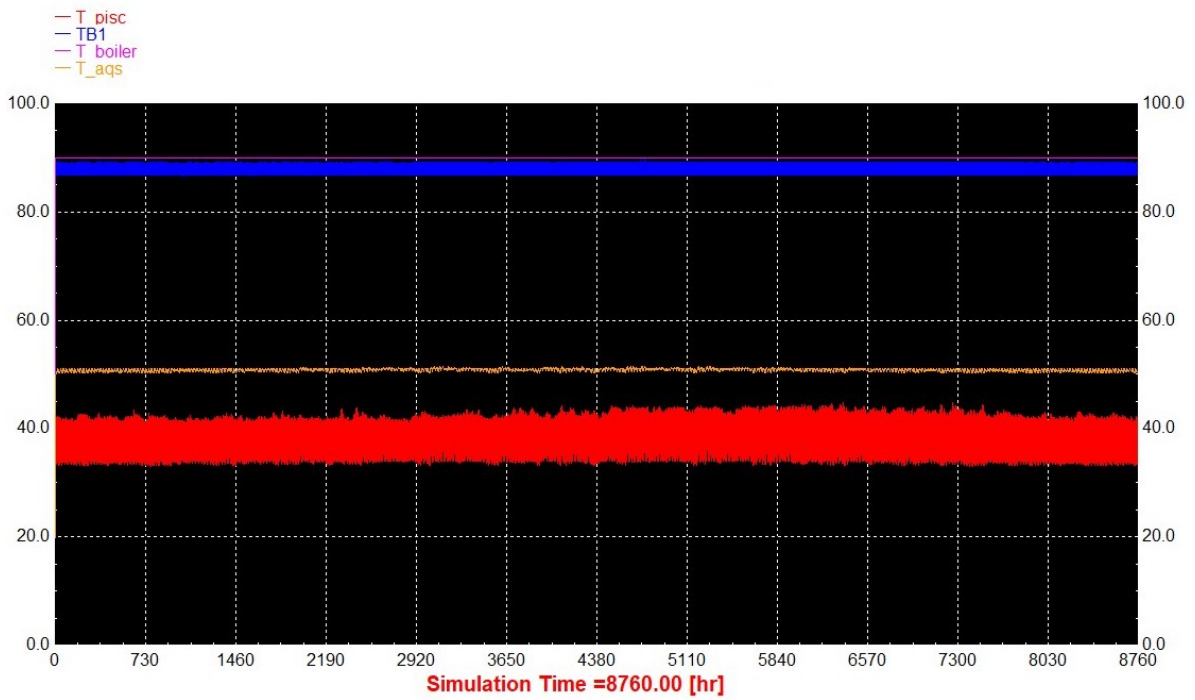


Figura 5.21: Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema com trigeriação (1/2).

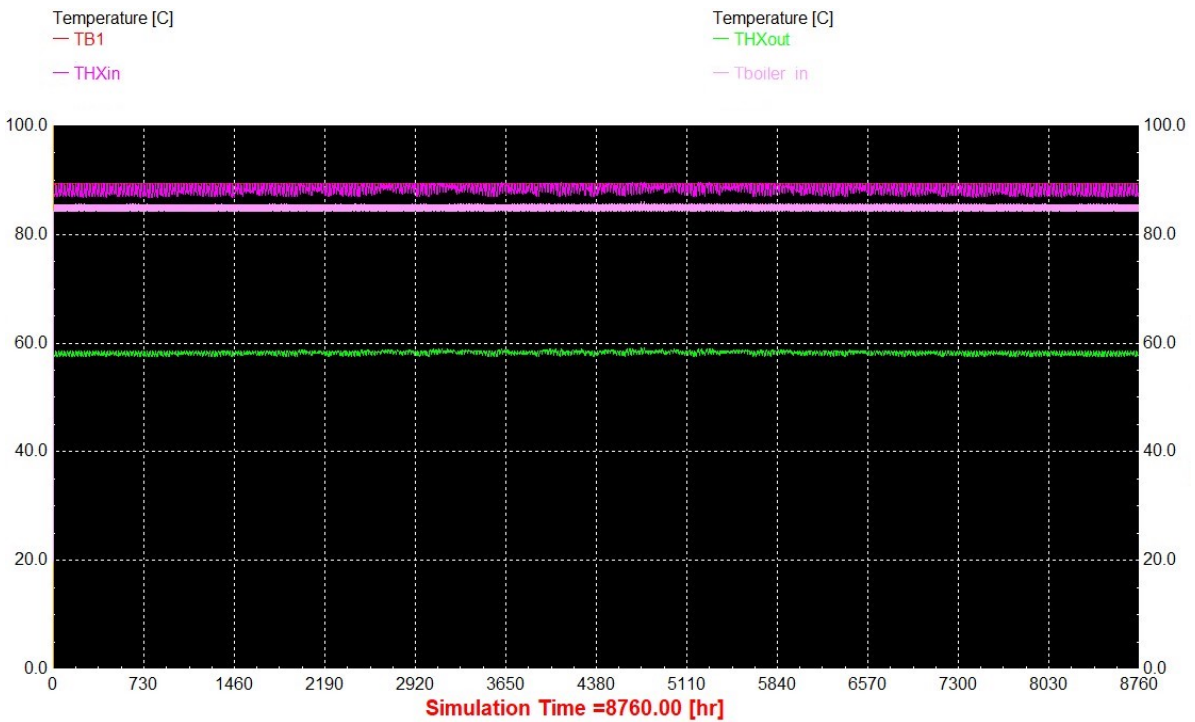


Figura 5.22: Gráfico das temperaturas envolvidas na produção de água quente para AQS e para as piscinas para a simulação do sistema com trigeriação (2/2).

Na Figura 5.21 é possível observar que a  $T_{aqs}$  é próxima dos 50°C, o que é mais elevado do que na simulação anterior, mas mais inferior que a primeira simulação, e ainda com poucas variações, pelo facto da caldeira servir unicamente para este propósito. Como a variável de controlo do termostato do AQS foi determinada para estar entre 45°C e 60°C, verifica-se que se encontra dentro dos parâmetros. Contudo, se numa aplicação prática se desejar ter uma temperatura de AQS superior à apresentada, é necessário ajustar a variável de controlo, ou o caudal de água quente proveniente da caldeira, ou a sua potência. A  $T_{disc}$  encontra-se, mais uma vez, entre os 35°C e 40°C, tal como pretendido. A caldeira produziu água quente a 90°C, tal como pretendido, também. Porém, a  $T_{boiler\_in}$  é um pouco elevada, estando acima dos 80°C, condição que pode danificar o equipamento. Num futuro trabalho seria necessário controlar esta temperatura melhor.

### 5.3.2 Consumos associados ao sistema da trigeriação

O objetivo da trigeriação é de ter um MCI que seja capaz de produzir energia térmica suficiente para cobrir as necessidades térmicas totais do edifício, assim como as necessidades elétricas. Assim, foi feito um balanço total à potência disponível no MCI e às necessidades do edifício que estão identificadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Balanço das potências disponíveis pelo MCI e das necessidades do edifício em [MWh/ano]

|  |        |
|--|--------|
| Potência Total do MCI                  | 1314   |
| Potência Térmica do MCI                | 726,6  |
| Necessidades Térmicas de Arrefecimento | 185,9  |
| Necessidades Térmicas de Aquecimento   | 1428,9 |
| Reminiscente Térmico                   | -887,9 |
| Potência Elétrica do MCI               | 587,4  |
| Necessidades Elétricas                 | 360,9  |
| Reminiscente Elétrico                  | 226,5  |

O MCI cobre primeiro as necessidades térmicas de arrefecimento, e, de seguida as de aquecimento, mas não tem potência suficiente para vencer as cargas térmicas de aquecimento, pelo que se torna necessário uma caldeira de apoio, tal como tinha sido previsto na simulação.

Relativamente eletricidade, o MCI produz cerca do dobro da eletricidade necessária contabilizada na simulação. Estes valores são aceitáveis, pois podem existir máquinas que não foram contabilizadas, e o restante pode ser vendido à rede, ou pode ser utilizado pelo resto do complexo.

Assim, em termos de distribuição de consumos, foi calculada para a simulação da trigeriação a distribuição percentual do consumo anual de energia final, por equipamento, e encontra-se representada na Figura 5.3.2.

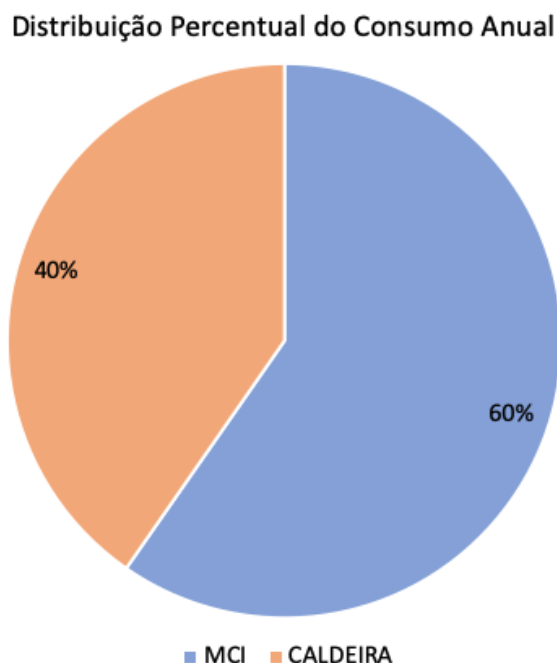


Figura 5.23: Distribuição do consumo anual de energia final por equipamento para a simulação da trigeriação, em (%).

Sendo que a caldeira assume o equivalente ao reminiscente térmico negativo presente na Tabela 5.3, e o MCI tem um uso energético total referenciado na mesma tabela, este sistema teve um uso de energia total de 887,9 kWh/ano.

## 5.4 Comparação dos 3 sistemas energéticos

Nesta secção, os três sistemas energéticos são comparados quer em termos de consumo total, quer em termos de distribuição de consumo. De acordo com o Despacho 15793-D/2013 [41], os fatores de conversão de energia final para energia primária utilizados foram os seguintes:

- $F_{pu} = 2,5 \text{ kWh}_{EP}/\text{kWh}$  para eletricidade, independentemente se tem origem renovável ou não;
- $F_{pu} = 1 \text{ kWh}_{EP}/\text{kWh}$  para os combustíveis sólidos, neste caso o gasóleo;
- $F_{pu} = 1 \text{ kWh}_{EP}/\text{kWh}$  para a energia térmica de origem renovável.

Na simulação das bombas de calor, por estas terem um COP e um EER superior a 2,5, foram consideradas como fontes de energia renovável.

Assim, o consumo total de energia primária para as três simulações é dado pelo gráfico presente na Figura 5.24

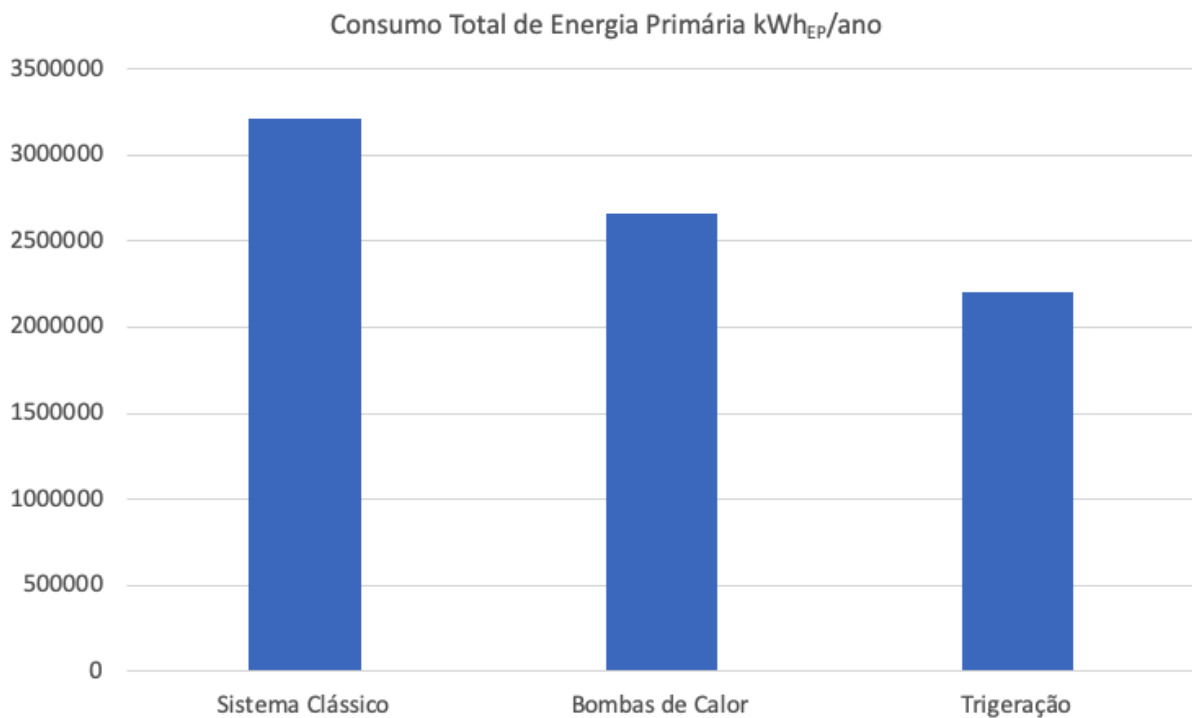


Figura 5.24: Consumo total de energia primária para três simulações: sistema clássico, bombas de calor e trigeração, em [kWh<sub>EP</sub>/ano]

Mediante a análise da Figura 5.24, é possível constatar uma diminuição de 553 MWh<sub>EP</sub>/ano entre o sistema clássico e o das bombas de calor – pelo facto destas serem uma fonte de energia renovável, e o *chiller* consumir energia elétrica, verificou-se uma diminuição do consumo de energia primária em 17%. Foi identificado também uma diminuição entre o sistema clássico e o da trigeração que poderá ser explicado pelo fator de conversão do combustível ser igual a 1, e como o sistema de trigeração é composto por um MCI e uma caldeira, que funcionam a gás-óleo, e que produzem parte da eletricidade necessária ao funcionamento do hotel, os consumos elétricos também baixam. A diminuição do consumo de energia entre estes sistemas foi igual a 1008 MWh<sub>EP</sub>/ano, correspondendo a uma diminuição de 31%, uma redução muito significativa.

Relativamente ao CO<sub>2</sub> equivalente, foram utilizados os fatores de conversão do Despacho 15793-D/2013 estão descritos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Fatores de conversão de energia primária para emissões de CO<sub>2</sub> (Adaptado de [41])

| Fonte de Energia | Fator de Conversão [kgCO <sub>2</sub> /kWh] |
|------------------|---|
| Eletricidade     | 0,144                                       |
| Gasóleo          | 0,267                                       |
| Renovável        | 0,0   |

O resultado do cálculo das emissões totais anuais para cada um dos sistemas energéticos considerados no trabalho está representado na Figura 5.25.

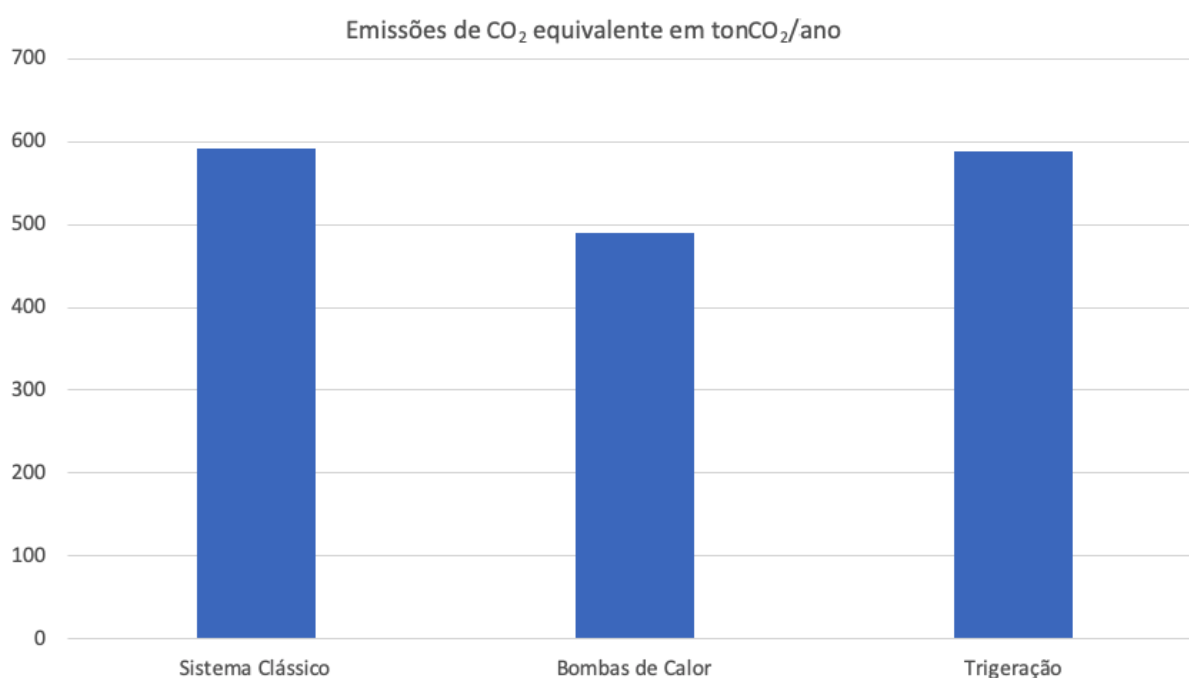


Figura 5.25: Comparação das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente para os 3 simulações em [tonCO<sub>2</sub>/ano]

Em relação às emissões de CO<sub>2</sub> o panorama é diferente da energia primária consumida. Verificou-se que entre o sistema clássico e o sistema com as bombas de calor ocorreu uma diminuição de 102 tonCO<sub>2</sub>/ano, o que significa uma diminuição de 17 %. Isto deve-se ao facto de se ter considerado as bombas de calor como fonte de energia renovável, e, por isso, o seu fator de conversão ser igual a 0. Em relação ao sistema com trigeração, a situação não é tão interessante, pois as emissões aumentaram, em relação ao sistema clássico 3 tonCO<sub>2</sub>/ano, o que corresponde a um aumento de 1%, significando que são praticamente iguais. Tal situação poderá ser explicada pelo facto de todos os elementos neste sistema energético usarem gasóleo como fonte de energia (MCI e caldeira) que - apesar de estarem compensados - também poluem

mais, tal como expresso nos dados obtidos. Contudo, em relação ao primeiro sistema, este tem mais componentes elétricos, que no sistema da trigeriação são compensados, por isso é normal que o valor seja marginalmente igual, embora que superior ao das bombas de calor.

## 5.5 Cálculo para atingir o estatuto nZEB

O cálculo de eficiência energética do edifício foi dividido em duas etapas. Na primeira foi considerado o edifício de serviços sem a componente das piscinas, pois esta é uma componente singular e sai das normas comuns estabelecidas para edifícios de serviços. Numa segunda etapa, foi considerado o edifício como um todo, e comparado com o edifício de referência para ser possível aferir valores de eficiência energética.

### 5.5.1 Eficiência Energética sem a componente das Piscinas

Nesta secção, o edifício foi considerado como um edifício de serviços, sem a componente das piscinas, e por isso foi aplicado o RECS. A Figura 5.26 ilustra a distribuição do consumo de energia por uso, desta componente do edifício.

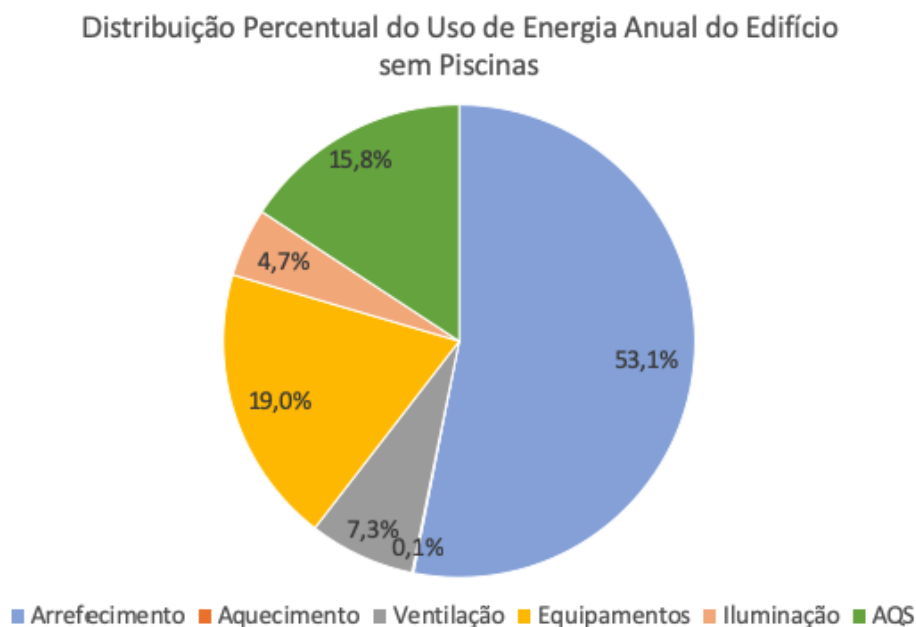


Figura 5.26: Distribuição percentual do uso de energia anual da configuração do edifício sem piscinas

Estes consumos correspondem aos valores descritos na Tabela 5.5

Tabela 5.5: Uso de energia anual de energia final por tipo de uso para a configuração do edifício sem piscinas em kWh/ano.

| Uso                    | Consumo [MWh/ano] |
|------------------------|-------------------|
| Arrefecimento          | 188,8             |
| Aquecimento            | 0,4               |
| Ventilação             | 25,8              |
| Equipamentos Elétricos | 67,7              |
| Iluminação             | 16,7              |
| AQS                    | 56,1              |
| Total                  | 355,5             |

De acordo com a Portaria 17-A/2016, o desempenho energético de um edifício de comércio e serviços é aferido pelo cálculo do seu indicador de eficiência energética (IEE). O indicador de eficiência energética previsto ( $IEE_{pr}$ ) procura estimar o consumo anual de energia com base na sua localização, características da sua envolvente, na eficiência dos sistemas técnicos e nos perfis de utilização previstos para o edifício, e que inclui as três parcelas da expressão 5.1. Este fator é utilizado para edifícios de serviços novos.

$$IEE_{pr} = IEE_{pr,S} + IEE_{pr,T} - IEE_{pr,REN} \quad [\text{kWh}_{EP}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}] \quad (5.1)$$

Em que:

- $IEE_{pr,S}$  representa o consumo anual de energia primária regulado (equipamentos envolvidos no aquecimento e arrefecimento ambiente, ventilação e bombagem dos sistemas de climatização, aquecimento de AQS e piscinas, iluminação interior, iluminação exterior, ascensores...) em  $[\text{kWh}_{EP}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}]$
- $IEE_{pr,T}$  representa o consumo anual de energia primária não regulado (equipamentos de ventilação e bombagem não associada ao controlo de carga térmica, equipamentos de frio...) em  $[\text{kWh}_{EP}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}]$
- $IEE_{pr,REN}$  representa a produção de energia elétrica e térmica de fontes renováveis e destinada ao autoconsumo (painéis fotovoltaicos, painéis solares térmicos...) em  $[\text{kWh}_{EP}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}]$

Estes fatores IEE são calculados com o recurso às seguintes equações:

$$IEE_{pr,S} = \frac{1}{A_p} \sum_i (E_{S,i} * F_{pu,i}) \quad (5.2)$$

$$IEE_{pr,T} = \frac{1}{A_p} \sum_i (E_{T,i} * F_{pu,i}) \quad (5.3)$$

$$IEE_{pr,REN} = \frac{1}{A_p} \sum_i (E_{REN,i} * F_{pu,i}) \quad (5.4)$$

Em que

- $A_p$  representa a área útil do pavimento em [m<sup>2</sup>]
- $E_i$  representa o consumo de energia por fonte  $i$  para os usos de tipo S ( $E_{S,i}$ ), ou tipo T ( $E_{T,i}$ ), e produção de energia elétrica e térmica por fonte renovável  $i$  ( $E_{REN,i}$ ) expresso em [kWh/ano]
- $F_{pu,i}$  representa os fatores de conversão de energia final para energia primária já descritos na secção 5.4.

A área do pavimento útil ( $A_p$ ) é igual a 1622,96 m<sup>2</sup>. Nesta configuração o sistema de coletores solares para produção de água quente foi adaptado ao consumo de AQS, sendo que não foi considerado o consumo nos balneários nem fornecimento de água quente para as piscinas, considerou-se metade do consumo anterior, e assim, metade da produção final de energia proveniente dos painéis solares térmicos

Em relação a equipamentos, e quando considerando o sistema clássico, considerou-se um *chiller* elétrico capaz de cobrir as necessidades de aquecimento e uma caldeira a gásóleo com capacidade para fornecer calor para os espaços e para o AQS. Em relação à simulação das bombas de calor, foi considerada uma bomba de calor água-água com um COP de 3,75 e um EER de 4,17, como anteriormente para climatizar os espaços, sendo o AQS produzido por uma caldeira a gásóleo. Em relação à trigeriação, adaptou-se o MCI para um de potência total de 50 kW, produzindo 22,4 kW de potência térmica e 27,6 kW de potência térmica, o que é suficiente para cobrir as necessidades térmicas, não necessitando, neste caso, de uma caldeira auxiliar.

Os resultados obtidos para os  $IEE_{pr}$  para cada um dos sistemas estão representados no gráfico da Figura 5.27.



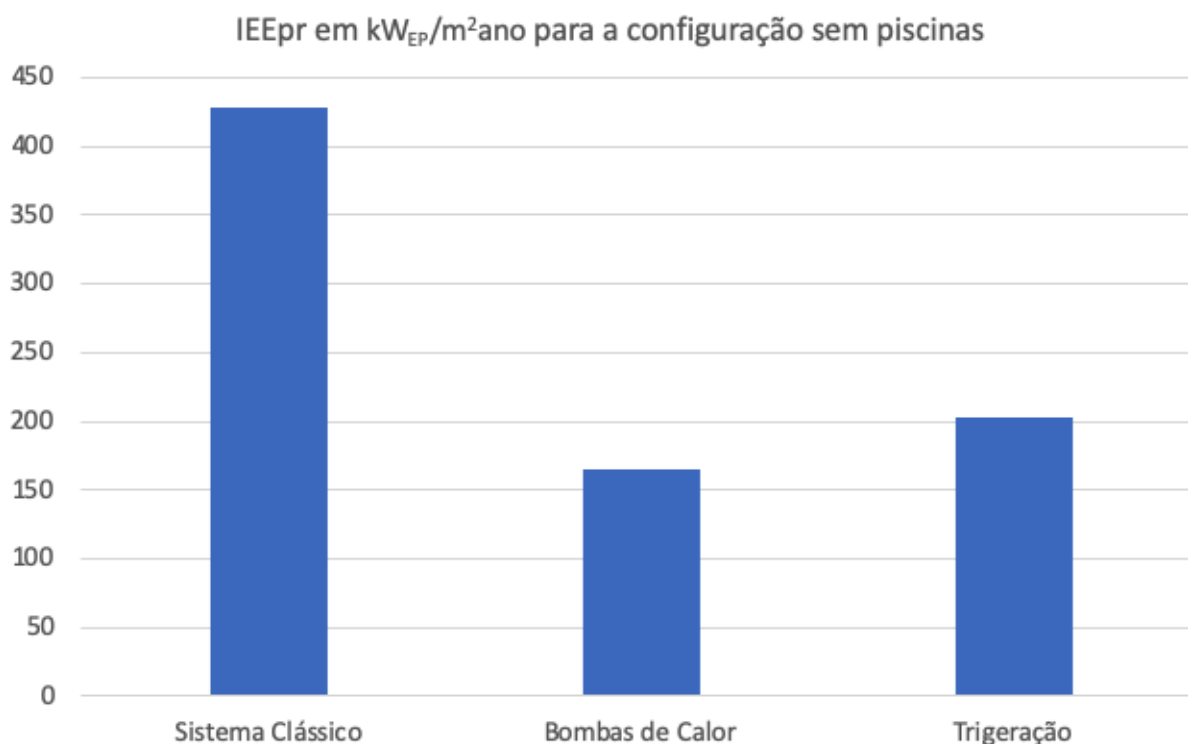


Figura 5.27: IEE<sub>pr</sub> para a configuração sem piscinas em kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.ano

Foi possível verificar uma melhoria significativa do sistema clássico, quando comparado com as bombas de calor, pelo simples facto de não haver um *chiller* elétrico, já que o fator de conversão da eletricidade é muito maior que os outros, e as necessidades de arrefecimento são, também as mais representativas. Outra razão pela qual o sistema com bombas de calor tem um desempenho energético tão eficiente foi porque a bomba de calor em causa é considerada em parte como fonte de energia renovável, contribuindo parcialmente de forma negativa para o IEE<sub>pr</sub>. Assim, obteve-se uma redução de 427,8 [kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.ano] para apenas 164,7 [kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.ano]. Finalmente, e em relação à trigeração, verificou-se, também, uma descida significativa pelo facto deste sistema apenas contar como fonte de energia o MCI. Contudo, como este consome gásóleo e consome bastante energia por um lado, havendo apenas a energia dos coletores solares térmicos para baixar o IEE<sub>pr</sub> por outro, não foi possível reduzir mais este valor que atingiu o mínimo de 202,4 [kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.ano].

Assim, e de acordo com a EPBD, bem como *standards* realizados por outros países (que indicam que um nZEB tem que ter as suas necessidades líquidas de energia abaixo de 100 [kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.ano], outros 50 [kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>.ano]) conclui-se que, de acordo com a literatura disponível esta configuração de edifício com as bombas de calor não é um nZEB, assim como a instalação com trigeração, mas apresentam melhorias significativas na eficiência energética : diminuição de 61,6% nas bombas de calor e 52,6% na trigeração face ao sistema clássico.

### 5.5.2 Eficiência Energética do edifício completo

A área do pavimento útil ( $A_p$ ) é igual a 24608,043 m<sup>2</sup>, sendo que existem 1074,84 m<sup>2</sup> de espaços complementares que não foram considerados neste parâmetro. Para calcular a eficiência energética é necessário conhecer os valores de referência, que entram no cálculo do  $IEE_{ref}$ .

Os valores de referência foram calculados, de acordo com o RECS e estão descritos na Tabela 5.6. Verificou-se que os consumos de tipo T são relativos aos das bombas das piscinas, as bombas dos *jacuzzis* e os equipamentos elétricos, sendo que os outros verificou-se serem todos de tipo S.

Tabela 5.6: Uso total de energia por tipo de uso para o edifício de referência em [kWh/ano]

| Uso                         | Valor [kWh/ano] |
|-----------------------------|-----------------|
| Aquecimento Espaços         | 198,5           |
| Aquecimento Piscinas (ar)   | 726439,1        |
| Arrefecimento Espaços       | 123683,2        |
| Arrefecimento Piscinas (ar) | 71218,2         |
| AQS quartos                 | 56704,8         |
| AQS piscinas                | 22681,9         |
| Reposição água piscinas     | 242847,1        |
| Bombas (climatização)       | 96758,8         |
| Bombas piscinas             | 19272,0         |
| Bombas <i>jacuzzis</i>      | 50862,8         |
| Equipamentos elétricos      | 72626,8         |
| Iluminação                  | 16694,3         |
| Ventilação espaços          | 21514,7         |
| Ventilação piscinas         | 59698,5         |
| $IEE_{ref,S}$               | 967,2           |
| $IEE_{ref,T}$               | 144,61          |

Os valores correspondentes ao  $IEE_{ref,S}$  e  $IEE_{ref,T}$  foram calculados com as mesmas equações apresentadas na secção 5.5.1 para os  $IEE_{pr,S}$  e  $IEE_{pr,T}$ , respetivamente. Neste caso, todo o aquecimento é feito por uma caldeira a gásóleo (usando o fator de conversão do gásóleo) e o arrefecimento é realizado por um *chiller* elétrico (usando o fator de conversão para energia primária da eletricidade). O AQS e a reposição da água das piscinas são assegurados pela caldeira, pelo que tem o fator de conversão associado ao gásóleo, também. Os restantes usos são elétricos, pelo que se usa, novamente, o fator de conversão da eletricidade.

Para o sistema clássico e para o da trigeriação, o valor correspondente ao  $IEE_{pr,REN}$  é o produzido pelos coletores solares, e é igual. No caso das bombas de calor, como estas têm um COP e um EER superior a 2,9, são consideradas como fonte renovável de energia e este valor é diferente. No que toca ao  $IEE_{pr,T}$  este é o mesmo para o sistema clássico e o das bombas de calor, mas na trigeriação não é porque as necessidades de eletricidade são cobertas pelo MCI que é alimentado a gásóleo, pelo que a sua energia primária é diferente. Para além disso, é necessário tirar os valores correspondentes a estas componentes à potência total do MCI para calcular o  $IEE_{pr,S}$  da trigeriação.

No sistema da trigeriação não é feita a discretização por elemento porque o MCI cobre todas as necessidades elétricas, e o restante das necessidades térmicas é assegurado pela caldeira. Assim, calcularam-se os valores diretamente sobre estes equipamentos. Fazer uma discretização seria uma má análise na trigeriação porque o MCI produz mais eletricidade do que a que é necessária pelo sistema, e isso deverá representado.

Tabela 5.7: Uso total de energia por tipo de uso para o edifício com o sistema clássico em [kWh/ano]

| Uso                         | Valor [kWh/ano] |
|-----------------------------|-----------------|
| Aquecimento Espaços         | 196,3           |
| Aquecimento Piscinas (ar)   | 718367,5        |
| Arrefecimento Espaços       | 94389,8         |
| Arrefecimento Piscinas (ar) | 54350,8         |
| AQS quartos                 | 56074,7         |
| AQS piscinas                | 22429,9         |
| Reposição água piscinas     | 240148,8        |
| Bombas (climatização)       | 96758,8         |
| Bombas piscinas             | 19272,0         |
| Bombas <i>jacuzzis</i>      | 50862,8         |
| Equipamentos elétricos      | 72626,8         |
| Iluminação                  | 16694,3         |
| Ventilação espaços          | 21514,7         |
| Ventilação piscinas         | 59698,5         |
| Produção Solar Térmico      | 219121,5        |
| $IEE_{pr,S}$                | 768,1           |
| $IEE_{pr,T}$                | 144,61          |
| $IEE_{pr,REN}$              | 88,8            |

Tabela 5.8: Uso total de energia por tipo de uso para o edifício com bombas de calor em [kWh/ano]

| Uso                         | Valor [kWh/ano] |
|-----------------------------|-----------------|
| Aquecimento Espaços         | 47,1            |
| Aquecimento Piscinas (ar)   | 718367,5        |
| Arrefecimento Espaços       | 86014,7         |
| Arrefecimento Piscinas (ar) | 49528,3         |
| AQS quartos                 | 56074,7         |
| AQS piscinas                | 22429,9         |
| Reposição água piscinas     | 240148,8        |
| Bombas (climatização)       | 96758,8         |
| Bombas piscinas             | 19272,0         |
| Bombas <i>jacuzzis</i>      | 50862,8         |
| Equipamentos elétricos      | 72626,8         |
| Iluminação                  | 16694,3         |
| Ventilação espaços          | 21514,7         |
| Ventilação piscinas         | 59698,5         |
| $IEE_{pr,S}$                | 617,4           |
| $IEE_{pr,T}$                | 144,61          |
| $IEE_{pr,REN}$              | 143,7           |

Tabela 5.9: Uso total de energia por tipo de uso para o edifício com trigeriação em [kWh/ano]

| Uso                        | Valor [kWh/ano] |
|----------------------------|-----------------|
| Motor de Combustão Interna | 1314000         |
| Caldeira                   | 887942          |
| $IEE_{pr,S}$               | 740,0           |
| $IEE_{pr,T}$               | 152,2           |
| $IEE_{pr,REN}$             | 88,8            |

Aplicando a Portaria nº 42/2019, calcularam-se os valores necessários para determinar se algum destes edifícios poderia ser nZEB.

Tabela 5.10: Aplicação da Portaria nº42/2019 aos três sistemas energéticos simulados

| Sistema          | $IEE_{pr,S}$ | $IEE_{pr,S}/IEE_{ref,S}$ | $R_{IEE}$ | Classe Energética |
|------------------|--------------|--------------------------|-----------|-------------------|
| Sistema Clássico | 768,1        | 0,79                     | 0,70      | B                 |
| Bombas de Calor  | 617,4        | 0,64                     | 0,48      | A                 |
| Trigeração       | 740,0        | 0,77                     | 0,67      | B                 |

De acordo com a Portaria nº 42/2019 o edifício com as bombas de calor é nZEB, uma vez que é o único com um valor de  $IEE_{pr,S}/IEE_{ref,S}$  inferior a 0,75 e também tem um  $R_{IEE}$  inferior a 0,5, tal como explicado na secção 2.4.3.1.

Um detalhe que se pode apontar é o consumo excessivo associado ao aquecimento do ar das piscinas. Isto é devido ao facto de não haver recuperação de calor para manter os equipamentos e a sala o mais livres possível de salitre, pois as piscinas são de água salgada e este espaço necessita muita atenção. Assim, no projeto foi considerado sempre 100% ar novo para as piscinas. Se se cumprir com a legislação que obriga a ter 50% de recuperação de calor, este valor seria reduzido para metade (porque se recupera metade), os valores a obter mediante a aplicação da Portaria seriam os seguintes:

Tabela 5.11: Aplicação da Portaria nº42/2019 aos três sistemas energéticos simulados com recuperação de calor hipotética

| Sistema          | $IEE_{pr,S}$ | $IEE_{pr,S}/IEE_{ref,S}$ | $R_{IEE}$ | Classe Energética |
|------------------|--------------|--------------------------|-----------|-------------------|
| Sistema Clássico | 622,6        | 0,64                     | 0,55      | B                 |
| Bombas de Calor  | 471,8        | 0,49                     | 0,33      | A                 |
| Trigeração       | 594,4        | 0,62                     | 0,52      | B                 |

Neste caso, apesar de todos os sistemas terem um valor de  $IEE_{pr,S}/IEE_{ref,S}$  inferior a 0,75, apenas o das bombas de calor cumpre o requisito do  $R_{IEE}$ . Ainda, e porque os outros sistemas energéticos apresentaram valores muito próximos, admite-se que algumas melhorias nalguns sistemas, poderiam permitir que se atingisse o valor necessário para a classificação nZEB também..

Assim, é possível identificar que algumas melhorias no sistema, como a inserção de recuperação de calor, fazem com que estes modelos com os sistemas energéticos diferentes, sejam bastante eficientes. A maior problemática encontrada foi o uso das piscinas que deverá ser bem controlado, de forma a evitar a degradação dos equipamentos e dos espaços devido à salitre por uma lado, bem como o consumo excessivo de água quente, que não respeita as normas.

# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusões

Neste projeto desenvolveram-se soluções de sistemas primários de climatização aplicadas a um edifício no setor hoteleiro, na perspectiva de o converter num edifício de energia quase nula, ou seja, um nZEB. Foi abordado o conceito de balanço energético quase nulo, através da legislação europeia e portuguesa. Foi utilizado o Decreto-Lei 118/2013 (RECS) para determinar os parâmetros e a eficiência energética do edifício em estudo.

Foram estudados três tipos de sistemas primários de climatização, sendo que o primeiro representa projeto realizado para o edifício na realidade. De seguida, este sistema foi adaptado ao uso de bombas de calor, e por último, um sistema de trigeriação que permite reduzir os consumos elétricos, usando um MCI que consome gásóleo, que tem um custo reduzido na ilha de Porto Santo.

Foram feitas simulações no TRNSYS para cada um dos sistemas, de forma a ter os dados mais realistas. A base da simulação foi a utilização dos ficheiros de dados das cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento dos espaços, sendo que as outras componentes foram calculadas segundo as necessidades do uso. Os dados à saída do TRNSYS foram estudados e foi possível obter os usos de energia totais para cada sistema. Concluiu-se que o sistema de bombas de calor tem uma melhoria de 17% em relação ao clássico se se converter os usos de energia para energia primária, e o sistema com trigeriação tem uma melhoria ainda maior (31%), sendo que este absorve os consumos elétricos associados ao sistema. Porém, numa análise de emissões de CO<sub>2</sub> o sistema de trigeriação é marginalmente igual ao clássico (aumento de 1%), sendo que apenas o das bombas de calor apresenta melhorias, com uma diminuição de 17%.

Este edifício apresenta características singulares associadas às piscinas, o que inviabiliza todo o tipo de associações com consumos padrão. Assim, foram adaptados os consumos calculados anteriormente para um edifício sem piscinas, com uma área diferente. Esta análise

revelou-se interessante, no sentido em que se calculou diretamente o  $IEE_{pr}$ , que corresponde ao balanço de energia primária, em função da área útil, dos consumos do edifício, e de acordo com as legislações de alguns países (ex: França, Chipre) que têm valores estabelecidos para a definição do nZEB, nenhuma das configurações energéticas se encontrou dentro desses parâmetros. Porém, registou-se uma melhoria significativa na eficiência energética dos sistemas de bombas de calor (diminuição de 61,5%) e de trigeriação (diminuição de 52,6%) face ao sistema clássico. Não foi feita uma análise de acordo com a legislação portuguesa, por falta de valores de referência, necessários ao cálculo.

Para o edifício completo, foram determinados os valores de referência, de forma a realizar o cálculo da eficiência energética, de acordo com a legislação portuguesa. De seguida calculou-se os parâmetros necessários à determinação se um edifício é nZEB ( $IEE_{pr,S}/IEE_{ref,S} \leq 75\%$  e  $R_{IEE} \leq 0,5$ ). Assim, determinou-se que apenas o edifício com o sistema das bombas de calor é nZEB, pois preenche os dois critérios estabelecidos pela legislação (64% e 0,48 respetivamente), correspondendo a uma certificação A. As outras duas configurações não cumprem os requisitos e têm classes energéticas B.

Fez-se, ainda, um estudo breve sobre o impacto da implementação da recuperação de calor no aquecimento do ar das piscinas, pois esta era a componente mais energética. Assim, calculando os mesmos parâmetros, obtiveram-se os mesmos resultados no que concerne ao estatuto nZEB, mas as outras configurações energéticas ficaram muito perto de a obter, satisfazendo o primeiro critério, e o segundo chegando muito mais perto do que sem recuperação (valor do  $R_{IEE}$  igual a 0,55 para o sistema clássico e 0,52 para a trigeriação). Assim, conclui-se que um sistema de recuperação de calor pode ser interessante para implementar no edifício, mas é necessário redobrar os cuidados na desumidificação de forma a que os materiais e os equipamentos não fiquem degradados com a salitre.

Conclui-se que é possível atingir a classificação nZEB neste edifício através do sistema energético das bombas de calor.

Conclui-se, também, que a legislação portuguesa tem limitações pelo facto de envolver um edifício de referência e não ser explícita em limitações de usos de energia máximos para atingir o nZEB, deixando esta definição amorfa. Porém, salvaguarda aspetos de origem singular, como as piscinas neste caso, que seria impossível de comparar com critérios fixos, pelo seu uso excessivo de água quente e consumos de aquecimento. A legislação portuguesa tem, ainda, oportunidades para tornar esta definição mais clara e mais acessível a quem projeta o edifício, como outros países europeus o fizeram.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Numa perspetiva de trabalhos futuros, poderia começar-se por utilizar a plataforma *Trns-build* de raíz para simular dinamicamente o edifício com maior detalhe, sem ter que utilizar dados do *EnergyPlus* em simultâneo com o TRNSYS, o que levou a que vários *Proformas* não pudessem ser utilizados (apenas com um edifício simulado e não ficheiros de cargas térmicas). Isto dificultou o processo de simulação, dado que apesar de parecer uma simplificação no início do processo, na altura da conclusão gerou mais problemas do que soluções.

Outro trabalho futuro que se sugere é o da integração de uma bomba de calor no sistema de trigeriação, que fizesse um pré-aquecimento da água, para que as necessidades térmicas da caldeira auxiliar fossem menores, e contribuindo para a fração de energia renovável desse sistema energético.

Poderá ainda ser realizado um estudo do custo de exploração, assim como do investimento associado a cada sistema energético, numa perspetiva de tentar compreender qual destes sistemas seria mais viável em termos financeiros, não apenas no momento da sua implementação mas também a médio e longo prazo, como um LCA (*Life Cycle Assessment*). Seria assim mais esclarecedor o cálculo do período de retorno do investimento associado a cada um dos sistemas energéticos, a sua sustentabilidade numa perspetiva mais ampla.



# Referências

- [1] M. Erlandsson, M. Borg. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs. *Building and Environment*, páginas 919–938, Volume 38, fevereiro 2003.
- [2] Parlamento Europeu e Conselho Europeu. Diretiva 2010/31/UE relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios. maio 2010.
- [3] M. Rabani, H. B. Madessa, N. Nord. A state-of-art review of retrofit interventions in buildings towards nearly zero energy level. *Energy Procedia*, páginas 317–326, Volume 134, outubro 2017.
- [4] M. Jaggs, J. Palmer. Energy performance indoor environmental quality retrofit — a European diagnosis and decision making method for building refurbishment. *Energy and Buildings*, páginas 97–101, Volume 31, fevereiro 2000.
- [5] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, C. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, páginas 394–398, Volume 40, março 2007.
- [6] International Energy Agency. Data and Statistics Disponível em <https://www.iea.org/data-and-statistics>.
- [7] Comissão Europeia. Proposal for a recast of the energy performance of buildings directive. Bruxelas, 2008
- [8] M. Economidou, B. Atanasiu , C. Despret , J. Maio, I. Nolte, O. Rapf, J. Laustsen, P. Ruysevelt, D. Staniaszek, D. Strong, S. Zinetti. Europe’s buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings. dezembro 2011.
- [9] Direção Geral da Energia e Geologia. Estratégia nacional a longo prazo para a mobilização de investimento na renovação de edifícios. 2017
- [10] T. Fowler, R. J. Southgate, T. Waite, R. Harrell, S. Kovats, A. Bone, V.Murray. Excess Winter Deaths in Europe: a multi-country descriptive analysis. *European Journal of Public Health*, páginas 339–345, Volume 25, junho 2014.
- [11] A. Hermelink, S. Schimschar, T. Boermans, L. Pagliano, P. Zangheri, R. Armani, K. Voss, E. Musall. Towards nearly zero-energy buildings - Definition of common principles under the EPBD. março 2013. Disponível em <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/>

[energy-performance-of-buildings/nearly-zero-energy-buildings](#).

Ecofys, Politecnico di Milano, eErg, University of Wuppertal.

- [12] A.J. Marszal, P. Heiselberg, J.S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, páginas 971–979, Volume 43, abril 2011.
- [13] P. Hernandez, P. Kenny. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). *Energy and Buildings*, páginas 815–821, Volume 42, junho 2010.
- [14] ATHENA Institute. ATHENA Impact Estimator. Disponível em <http://www.athenaasmi.ca>.
- [15] K. Butti, J. Perin. A golden thread: 2500 years of solar architecture and technology. Van Nostrand Reinhold Company, 1980.
- [16] S. Deng, R.Z. Wang, Y.J. Dai. How to evaluate performance of net zero energy building - A literary research. *Energy*, páginas 1–16, Volume 71, maio 2014.
- [17] I. Sartori, A. Napolitano, A. Marszal, S. Pless, P. Torcellini, K. Voss. Criteria for definition of net Zero Energy Buildings. Disponível em <http://www.iea-shc.org/publications/task.aspx?Task=40>.
- [18] J. Kurnitski (REHVA). Technical definition for nearly zero energy buildings. *REHVA Journal*, páginas 22–28, maio 2013.
- [19] Lund, Henrik The Role of Sustainable Buildings in 100 *e-nova International Kongress 2010* Disponível em <https://vbn.aau.dk/en/publications/the-role-of-sustainable-buildings-in-100-renewable-energy-systems>. Aalborg Universitet
- [20] Parlamento Europeu e Conselho Europeu. Diretiva 2018/844/UE relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios que altera a Diretiva 2010/31/UE. maio 2018.
- [21] S. Attia, P. Eleftheriou, F. Xeni, R. Morlot, C. Ménézo, V. Kostopoulos, M. Betsi, I. Kalitzioglou, L. Pagliano, M. Cellura, M. Almeida, M. Ferreira, T. Baracu, V. Badescu, R. Crutescu, J. M. Hidalgo-Betanzos. Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe. *Energy and Buildings*, páginas 439–458, Volume 155, novembro 2017.
- [22] Conselho Europeu para a Economia da Eficiência Energética (ecee). EPBD consultation, review, possible revision and nZEB: A methodological discussion and proposals by ecee. 2015 Disponível em <http://www.buildup.eu/en/node/49696>.
- [23] A. Figueiredo, J. Kämpf, R. Vicente. Passive house optimization for Portugal: Overheating evaluation and energy performance. *Energy and Buildings*, páginas 181–196, Volume 118, abril 2016.

- [24] Portaria nº 17-A/2016. Trabalho, Solidariedade e Segurança Social e Economia. 4 de fevereiro de 2016.
- [25] Despacho do Diretor-Geral da Energia e Geologia nº15793-J/2013. Decreto-Lei nº 118/2013. 3 de dezembro de 2013.
- [26] Clito Afonso. Sistemas Frigoríficos. Efeitos Gráficos, 2019.
- [27] J.F. Urchueguía, M. Zacarés, J.M. Corberán, Á. Montero, J. Martos, H. Witte. Comparison between the energy performance of a ground coupled water to water heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast. *Energy Conversion and Management*, páginas 2917–2923, Volume 49, abril 2008.
- [28] K.J. Chua, S.K. Chou, W.M. Yang. Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*, páginas 3611–3624, Volume 87, dezembro 2010.
- [29] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE handbook Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2017.
- [30] D.W. Wu, R.Z. Wang. Combined cooling, heating and power: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, páginas 459–495, Volume 32, agosto 2006.
- [31] Carlos Tavares Pinho. Gestão de Energia Térmica. Departamento de Engenharia Mecânica, FEUP, 2018
- [32] Ministério da Economia e do Emprego. Decreto-Lei nº 118/2013. 20 de agosto de 2013.
- [33] Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Climatologia e Anos Meteorológicos de Referência para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios. 2013. Disponível em <https://www.lneg.pt/servicos/328/2263/>.
- [34] Despacho do Diretor-Geral da Energia e Geologia nº15793-K/2013. Decreto-Lei nº 118/2013. 3 de dezembro de 2013.
- [35] J. Fernandes, C. Pimenta, R. Mateus, S. Silva, L. Bragança. Contribution of Portuguese Vernacular Building Strategies to Indoor Thermal Comfort and Occupants' Perception. *Buildings*, páginas 1242–1264, Volume 5, novembro 2015.
- [36] D. Olsson, C. Heincke, C. Nilsson. Simply GREEN, A quick guide to environmental and energy certification systems for sustainable buildings. Swegon Air Academy, 2013.
- [37] P. Holzer. Passivhaus Schulungsunterlagen. Haus der Zukunft. janeiro 2007
- [38] U. Desideri, L. Arcioni, D. Leonardi, L. Cesaretti, P. Perugini, E. Agabiti, N. Evangelisti. Design of a multipurpose “zero energy consumption” building according to European Directive 2010/31/EU: Life cycle assessment. *Energy and Buildings*, páginas 585–597, Volume 80, maio 2014.

- [39] V. Badescu, N. Rotar, I. Udrea. Considerations concerning the feasibility of the German Passivhaus concept in Southern Hemisphere. *Energy and Efficiency*, páginas 919–949, Volume 8, outubro 2015.
- [40] O. Marc, F. Lucas, F. Sinama, E. Monceyron. Experimental investigation of a solar cooling absorption system operating without any backup system under tropical climate. *Energy and Buildings*, páginas 774–782, Volume 42, junho 2010.
- [41] Despacho do Diretor-Geral da Energia e Geologia nº15793-D/2013. Decreto-Lei nº 118/2013. 3 de dezembro de 2013.
- [42] C. Ionescu, T. Baracu, G. Vlad, E. Necula, A. Badea. The historical evolution of the energy efficient buildings. *Sustainable Energy Reviews*, páginas 243–253, Volume 49, abril 2015.

## Anexo A

# Cálculo detalhado da inércia térmica do edifício

A inércia térmica do edifício, tal como referenciada na secção 3.1.5, foi calculada através dos dados da envelope térmica e os dados do *software EnergyPlus*, onde foi possível determinar a área correspondente a cada tipo de elemento construtivo, para realizar o cálculo.

As Tabelas com as componentes completas de cada elemento construtivo encontram-se na secção 3.1.3.

A tabela A.1 indica os valores determinados para as massas superficiais de cada elemento construtivo. Note-se que não está representado o valor do piso interior, porque este é igual à cobertura interior.

Tabela A.1: Cálculo das massas superficiais dos elementos construtivos

| Elemento Construtivo | $\rho$ [kg/m <sup>2</sup> ] | e [mm] | $m_i$ [kg/m <sup>2</sup> ] |
|----------------------|-----------------------------|--------|----------------------------|
| Parede Exterior      | 6890                        | 370    | 2549,3                     |
| Piso Exterior        | 2283                        | 254    | 579,9                      |
| Cobertura Exterior   | 15875                       | 114    | 1809,8                     |
| Cobertura Exterior 2 | 4615                        | 323,2  | 1491,6                     |
| Cobertura Interior   | 2240                        | 203,2  | 455,2                      |
| Parede Interior      | 3400                        | 130    | 442                        |

De acordo com o Despacho nº 15793-K/2013 [34], a massa superficial útil  $M_{si}$  nem sempre é igual à massa superficial de um dado elemento construtivo. Para determinar o valor da  $M_{si}$  é necessário dividir os elementos construtivos em 3 grupos: EL1, EL2 e EL3:

- EL1 - Elementos da envolvente exterior, ou interior que estejam em contacto com zonas não climatizadas ou edifício adjacente;

- EL2 - Elementos em contacto com o solo;
- EL3 - Elementos de compartimentação entre zonas climatizadas.

Os elementos construtivos presentes no edifício podem, então ser divididos nestas categorias:

- EL1 - Parede Exterior, Cobertura Exterior, Cobertura Exterior 2;
- EL2 - Piso Exterior;
- EL3 - Cobertura Interior, Parede Interior.

O valor do  $r$  varia consoante o valor da resistência térmica do revestimento superficial interior, e tem regras diferentes consoante o grupo de elemento construtivo. Assim, para se determinar os valores correspondentes à  $M_{si}$  e  $r$  utilizam-se as categorias.

## A.1 Determinação de $M_{si}$ e $r$

### A.1.1 Elementos EL1

O Despacho [34] indica que a  $M_{si} = m_i$  para camadas com isolamento térmico quando não existe caixa de ar, em que  $m_i$  é a massa do elemento desde o isolamento térmico até à face interior. O valor de  $M_{si}$  nunca pode ser superior a  $150 \text{ kg/m}^2$ .

Quanto ao  $r$ , este toma valores diferentes para a resistência térmica do revestimento superficial interior associada  $R$ , tal como indicado abaixo:

- Se  $R > 0,3 \text{ [m}^2\text{C/W]}$  —  $r = 0$ ;
- Se  $0,14 \text{ [m}^2\text{C/W]} \leq R \leq 0,3 \text{ [m}^2\text{C/W]}$  —  $r = 0,5$ ;
- Se  $R < 0,14 \text{ [m}^2\text{C/W]}$  —  $r = 1$ .

Assim sendo, a tabela A.2 indica os novos valores de  $m_i$ ,  $M_{si}$ , e  $r$  para os elementos construtivos que pertencem a esta categoria. Note-se que os valores indicados são apenas para as camadas desde o isolamento térmico até à face interior, tal como indica o Despacho.

Tabela A.2: Cálculo dos valores de  $m_i$ ,  $M_{si}$ ,  $r$  para os elementos EL1

| Elemento Construtivo | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | e [mm] | $m_i$ [kg/m <sup>2</sup> ] | $M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ] | $r$ |
|----------------------|-----------------------------|--------|----------------------------|-------------------------------|-----|
| Parede Exterior      | 3400                        | 170    | 578                        | 150                           | 1   |
| Cobertura Exterior   | 7850                        | 7      | 55                         | 55                            | 1   |
| Cobertura Exterior 2 | 2240                        | 203,2  | 455,2                      | 150                           | 1   |

### A.1.2 Elementos EL2

Assim como para os elementos EL1, o Despacho [34] indica que a  $M_{si} = m_i$  para camadas com isolamento térmico, em que  $m_i$  é a massa do elemento desde o isolamento térmico até à face interior. O valor de  $M_{si}$  nunca pode ser superior a  $150 \text{ kg/m}^2$ .

Quanto ao  $r$ , os valores que este toma são os mesmos que para os elementos EL1.

Assim sendo, a tabela A.3 indica os novos valores de  $m_i$ ,  $M_{si}$ , e  $r$  para os elementos construtivos que pertencem a esta categoria. Note-se que os valores indicados são apenas para as camadas desde o isolamento térmico até à face interior, tal como indica o Despacho.

Tabela A.3: Cálculo dos valores de  $m_i$ ,  $M_{si}$ ,  $r$  para os elementos EL2

| Elemento Construtivo | $\rho$ [ $\text{kg/m}^2$ ] | $e$ [mm] | $m_i$ [ $\text{kg/m}^2$ ] | $M_{si}$ [ $\text{kg/m}^2$ ] | $r$ |
|----------------------|----------------------------|----------|---------------------------|------------------------------|-----|
| Piso Exterior        | 2240                       | 203,2    | 455,2                     | 150                          | 1   |

### A.1.3 Elementos EL3

Para os elementos EL3, o Despacho [34] indica que a  $M_{si} = m_i$  onde  $m_i$  corresponde à massa total do elemento, se este não for isolado, o que é o caso dos elementos construtivos presentes no edifício. O valor de  $M_{si}$  nunca pode ser superior a  $300 \text{ kg/m}^2$ .

Quanto ao  $r$ , os valores que este toma são os mesmos que para os elementos EL1 e EL2, porque os elementos EL3, neste caso, não têm isolamento térmico.

Assim sendo, a tabela A.4 indica os novos valores de  $m_i$ ,  $M_{si}$ , e  $r$  para os elementos construtivos que pertencem a esta categoria. Note-se que os valores indicados são apenas para as camadas desde o isolamento térmico até à face interior, tal como indica o Despacho.

Tabela A.4: Cálculo dos valores de  $m_i$ ,  $M_{si}$ ,  $r$  para os elementos EL3

| Elemento Construtivo | $\rho$ [ $\text{kg/m}^2$ ] | $e$ [mm] | $m_i$ [ $\text{kg/m}^2$ ] | $M_{si}$ [ $\text{kg/m}^2$ ] | $r$ |
|----------------------|----------------------------|----------|---------------------------|------------------------------|-----|
| Cobertura Interior   | 2240                       | 203,2    | 455,2                     | 300                          | 1   |
| Parede Interior      | 3400                       | 130      | 442                       | 300                          | 1   |

## A.2 Determinação de $I_t$

Com todos os elementos calculados é possível determinar a inércia térmica do edifício. Falta, ainda, indicar que a área útil do edifício  $A_p$  foi obtida ao somar as áreas totais do edifício e subtrair as zonas dos espaços complementares no projeto. A Tabela A.5 mostra o resumo dos dados e o resultado final para a inércia térmica.

Tabela A.5: Cálculo da inércia térmica  $I_t$

| Elemento Construtivo                       | $M_{si}$ [kg/m <sup>2</sup> ] | $S_i$ [m <sup>2</sup> ] | $r$ | $M_{si} * S_i * r$ |
|--|-------------------------------|-------------------------|-----|--------------------|
| Parede Exterior                            | 150                           | 1526,6                  | 1   | 228985,5           |
| Piso Exterior                              | 150                           | 1969,5                  | 1   | 295431             |
| Cobertura Exterior                         | 55                            | 1788,9                  | 1   | 98297,3            |
| Cobertura Exterior 2                       | 150                           | 174,1                   | 1   | 26107,5            |
| Cobertura Interior                         | 300                           | 1675,5                  | 1   | 502644             |
| Parede Interior                            | 300                           | 4595,1                  | 1   | 1378518            |
| Soma                                       |                               |                         |     | 2529983,3          |
| Área Útil [m <sup>2</sup> ]                |                               |                         |     | 2468,043           |
| Inércia Térmica $I_t$ [kg/m <sup>2</sup> ] |                               |                         |     | 1025,1             |



## Anexo B

### Características técnicas dos equipamentos

Neste anexo encontram-se as características técnicas dos equipamentos instalados no complexo, assim como os que foram utilizados para implementação no estudo.

#### B.1 Coletores solares A200

Tabela B.1: Características técnicas dos coletores solares térmicos A200

| Referência   | A200                        |
|--|-----------------------------|
| Tipo   | Coletor plano com cobertura |
| Área do absorvedor [m <sup>2</sup> ]               | 2,05                        |
| Área de abertura [m <sup>2</sup> ]                 | 2,06                        |
| Área total [m <sup>2</sup> ]                       | 2,20                        |
| Dimensões (mm x mm x mm)                           | 2055 x 2072 x 85            |
| Fluido de transferência                            | Água com propileno glicol   |
| Peso [kg]  | 46,3                        |
| Pressão máxima de funcionamento [kPa]              | 1000                        |
| Temperatura de estagnação [°C]                     | 202,5                       |
| Capacidade Térmica [kJ/K]                          | 11,5                        |
| Modificador de ângulo de incidência                | $K_L(\theta=50^\circ)=0,89$ |
| Rendimento instantâneo baseado na área de abertura |                             |
| $\eta_0$   | 0,744                       |
| $a_1[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$               | 4,162                       |
| $a_2[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-2}]$               | 0,014                       |
| Pico de potência [W]                               | 1534                        |

## Anexo C

# Consumo horário de AQS e Taxa de ocupação do Hotel

A Tabela C.1 mostra os fatores utilizados para o consumo horário de AQS, onde a soma total é igual a 1. Estes fatores assemelham-se a um consumo típico de um hotel onde há banhos nos quartos duas vezes por dia.

O método utilizado foi determinar uma percentagem de utilização do caudal total para cada hora, e de seguida somar esses valores ao fim de um dia. Depois, cada um dos fatores previamente determinados foi dividido pela soma calculada anteriormente, de forma a se atingir uma soma total de utilização diária de 1. Estes valores podem não corresponder à realidade mas permitem fazer uma boa aproximação do comportamento real do edifício.

Tabela C.1: Consumo horário de AQS normalizado para a Talassoterapia

| Hora do dia | Distribuição do Consumo (%) | Hora do dia | Distribuição do Consumo (%) |
|-------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|
| 0           | 0                           | 12          | 5,41                        |
| 1           | 0                           | 13          | 2,7                         |
| 2           | 0                           | 14          | 0                           |
| 3           | 0                           | 15          | 2,7                         |
| 4           | 0                           | 16          | 2,7                         |
| 5           | 0                           | 17          | 5,41                        |
| 6           | 2,7                         | 18          | 10,81                       |
| 7           | 2,7                         | 19          | 10,81                       |
| 8           | 5,41                        | 20          | 5,41                        |
| 9           | 10,81                       | 21          | 2,7                         |
| 10          | 10,81                       | 22          | 5,41                        |
| 11          | 10,81                       | 23          | 2,7                         |

A Figura C.1 apresenta a taxa de ocupação do hotel, e, conseqüentemente, da Talassoterapia, para todos os dias do ano. Estes valores foram medidos pelo próprio hotel permitindo efetuar o cálculo das necessidades térmicas afetas ao consumo de AQS.

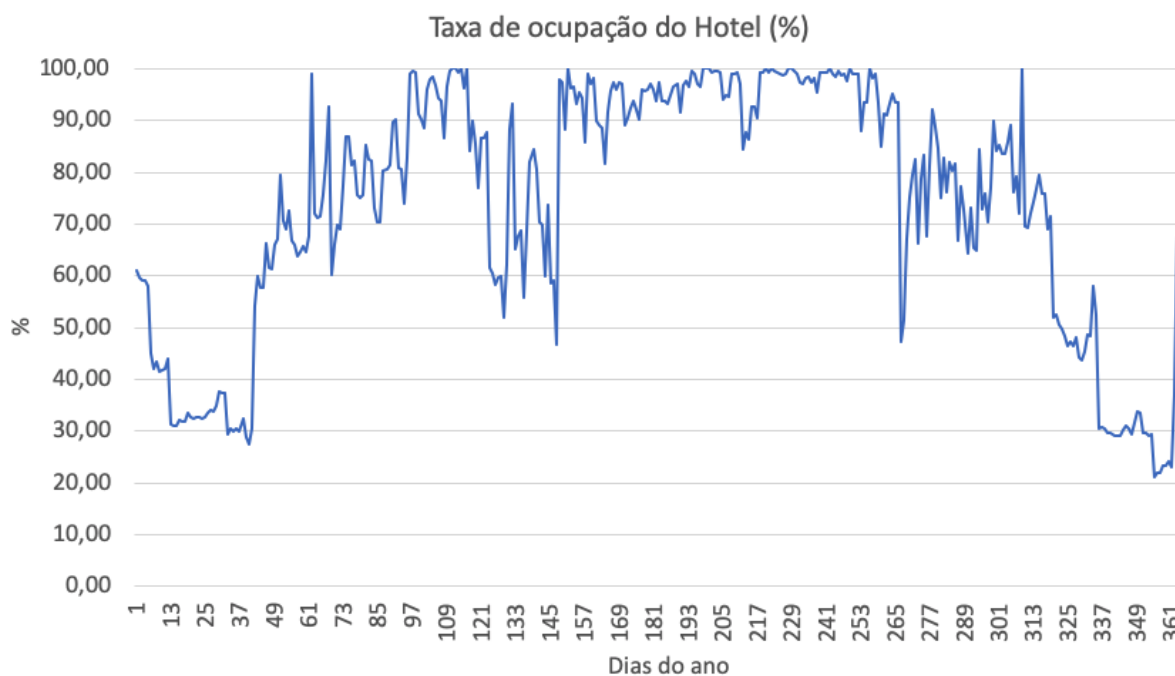


Figura C.1: Distribuição percentual diária da taxa de ocupação anual do hotel.

## **Anexo D**

# **Lista das rotinas utilizadas no *software* TRNSYS para cada simulação**

As listas das rotinas usadas no *software* TRNSYS para cada simulação encontram-se nas seções seguintes.

### **D.1 Simulação do sistema clássico**

A lista das rotinas *proforma* usadas no sistema clássico estão descritas na Tabela [D.1](#).

### **D.2 Simulação do sistema com bombas de calor**

A lista das rotinas *proforma* usadas no sistema com bombas de calor estão descritas na Tabela [D.2](#).

### **D.3 Simulação do sistema com trigerção**

A lista das rotinas *proforma* usadas no sistema com bombas de calor estão descritas na Tabela [D.3](#).

Tabela D.1: Lista de componentes *Proforma* utilizados para a simulação do sistema clássico

| Componente       | Descrição   |
|------------------|---|
| <i>Type 15-3</i> | Leitor de dados climáticos em formato <i>EnergyPlus</i> |
| <i>Type 142</i>  | <i>Chiller</i> água-água                                |
| <i>Type 122</i>  | Caldeira  |
| <i>Type 5b</i>   | Permutador de calor de fluxos opostos sem mistura       |
| <i>Type 147</i>  | Ventilador de caudal regulável                          |
| <i>Type 110</i>  | Bombas de circulação de caudal regulável                |
| <i>Type 166</i>  | Termostato que funciona como controlador ON/OFF         |
| <i>Type 158</i>  | Tanque de inércia miscível                              |
| <i>Type 65d</i>  | Componente de saída dos dados em formato gráfico        |
| <i>Type 25c</i>  | Componente de saída de dados em formato texto           |
| <i>Type 1b</i>   | Coletores Solares seletivos planos                      |
| <i>Type 165</i>  | Controlador ON/OFF com histerese                        |
| <i>Type 5e</i>   | Permutador de calor de fluxos cruzados não miscíveis    |
| <i>Type 647</i>  | Válvula de divisão de caudal para $n$ vias              |
| <i>Type 649</i>  | Válvula de mistura de caudal                            |
| <i>Type 11d</i>  | Válvula de mistura de caudal controlável                |
| <i>Type 11f</i>  | Válvula de divisão de caudal em 2 vias controlável      |
| <i>Type 753</i>  | Bateria de quente                                       |
| <i>Type 508</i>  | Bateria de frio   |
| <i>Type 14</i>   | Função horária de multiplicação                         |
| <i>Type 9c</i>   | Componente de entrada de dados exteriores               |

Tabela D.2: Lista de componentes *Proforma* utilizados para a simulação do sistema com bombas de calor

| Componente       | Descrição  |
|------------------|--|
| <i>Type 15-3</i> | Leitor de dados climáticos em formato <i>EnergyPlus</i>        |
| <i>Type 142</i>  | <i>Chiller</i> água-água a funcionar como bomba de calor ar-ar |
| <i>Type 927</i>  | Bomba de calor água-água                                       |
| <i>Type 122</i>  | Caldeira   |
| <i>Type 5b</i>   | Permutador de calor de fluxos opostos sem mistura              |
| <i>Type 147</i>  | Ventilador de caudal regulável                                 |
| <i>Type 110</i>  | Bombas de circulação de caudal regulável                       |
| <i>Type 166</i>  | Termostato que funciona como controlador ON/OFF                |
| <i>Type 158</i>  | Tanque de inércia miscível                                     |
| <i>Type 65d</i>  | Componente de saída dos dados em formato gráfico               |
| <i>Type 25c</i>  | Componente de saída de dados em formato texto                  |
| <i>Type 1b</i>   | Coletores Solares seletivos planos                             |
| <i>Type 165</i>  | Controlador ON/OFF com histerese                               |
| <i>Type 5e</i>   | Permutador de calor de fluxos cruzados não miscíveis           |
| <i>Type 647</i>  | Válvula de divisão de caudal para $n$ vias                     |
| <i>Type 649</i>  | Válvula de mistura de caudal                                   |
| <i>Type 11d</i>  | Válvula de mistura de caudal controlável                       |
| <i>Type 11f</i>  | Válvula de divisão de caudal em 2 vias controlável             |
| <i>Type 753</i>  | Bateria de quente  |
| <i>Type 508</i>  | Bateria de frio  |
| <i>Type 14</i>   | Função horária de multiplicação                                |
| <i>Type 9c</i>   | Componente de entrada de dados exteriores                      |

Tabela D.3: Lista de componentes *Proforma* utilizados para a simulação do sistema com bombas de calor

| Componente       | Descrição   |
|------------------|---|
| <i>Type 15-3</i> | Leitor de dados climáticos em formato <i>EnergyPlus</i> |
| <i>Type 107</i>  | <i>Chiller</i> de absorção                              |
| <i>Type 907</i>  | Motor de combustão interna (MCI)                        |
| <i>Type 652</i>  | Permutador de calor para a água de arrefecimento do MCI |
| <i>Type 122</i>  | Caldeira  |
| <i>Type 5b</i>   | Permutador de calor de fluxos opostos sem mistura       |
| <i>Type 147</i>  | Ventilador de caudal regulável                          |
| <i>Type 110</i>  | Bombas de circulação de caudal regulável                |
| <i>Type 166</i>  | Termostato que funciona como controlador ON/OFF         |
| <i>Type 158</i>  | Tanque de inércia miscível                              |
| <i>Type 65d</i>  | Componente de saída dos dados em formato gráfico        |
| <i>Type 25c</i>  | Componente de saída de dados em formato texto           |
| <i>Type 1b</i>   | Coletores Solares seletivos planos                      |
| <i>Type 165</i>  | Controlador ON/OFF com histerese                        |
| <i>Type 5e</i>   | Permutador de calor de fluxos cruzados não miscíveis    |
| <i>Type 647</i>  | Válvula de divisão de caudal para $n$ vias              |
| <i>Type 649</i>  | Válvula de mistura de caudal                            |
| <i>Type 11d</i>  | Válvula de mistura de caudal controlável                |
| <i>Type 11f</i>  | Válvula de divisão de caudal em 2 vias controlável      |
| <i>Type 753</i>  | Bateria de quente                                       |
| <i>Type 508</i>  | Bateria de frio   |
| <i>Type 14</i>   | Função horária de multiplicação                         |
| <i>Type 9c</i>   | Componente de entrada de dados exteriores               |

# Anexo E

## Distribuição anual dos consumos de cada equipamento após simulações

### E.1 Simulação do sistema clássico

Para o sistema clássico, os equipamentos considerados foram:

- Caldeira
- *Chiller*
- Bombas de Circulação
- Ventilação
- Iluminação e Equipamentos Elétricos
- Bombas para os Elementos Lúdicos

No ano considerado, os consumos da caldeira têm a distribuição horária representada na [Figura E.1](#)



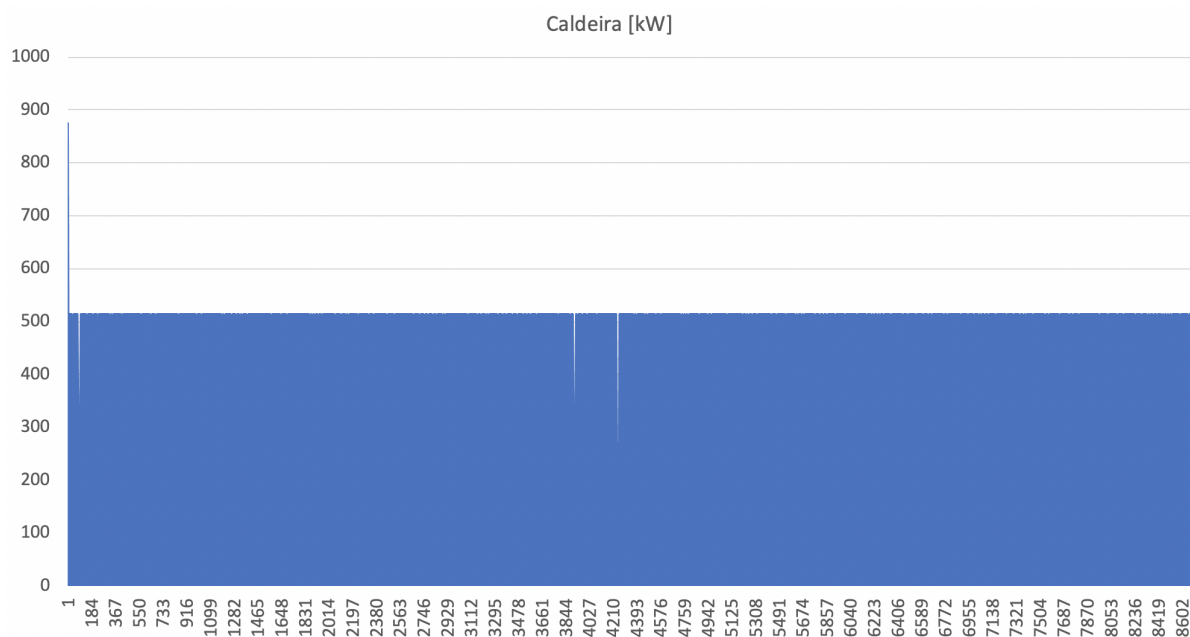


Figura E.1: Consumo anual da caldeira para a simulação do sistema clássico em [kW].

Os consumos do *chiller* têm a distribuição horária representada na Figura E.2

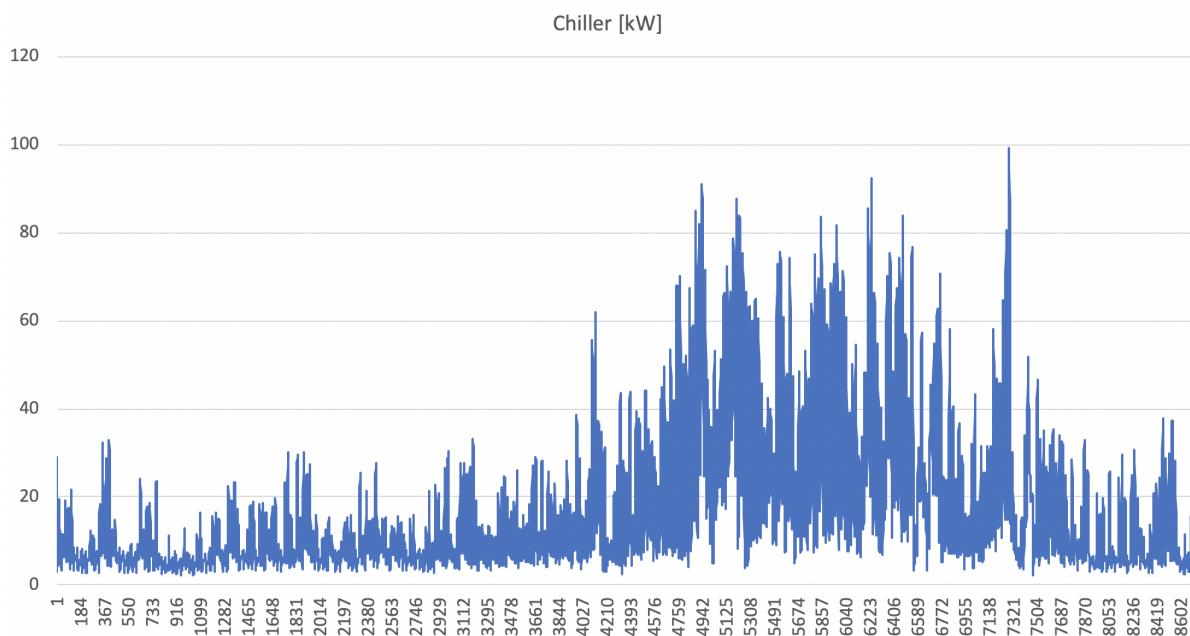


Figura E.2: Consumo anual da *chiller* para a simulação do sistema clássico em [kW].

Os consumos das bombas de circulação têm a distribuição horária representada na Figura E.3

## Avaliação de Soluções de Climatização aplicadas na Hotelaria para atingir a classificação nZEB

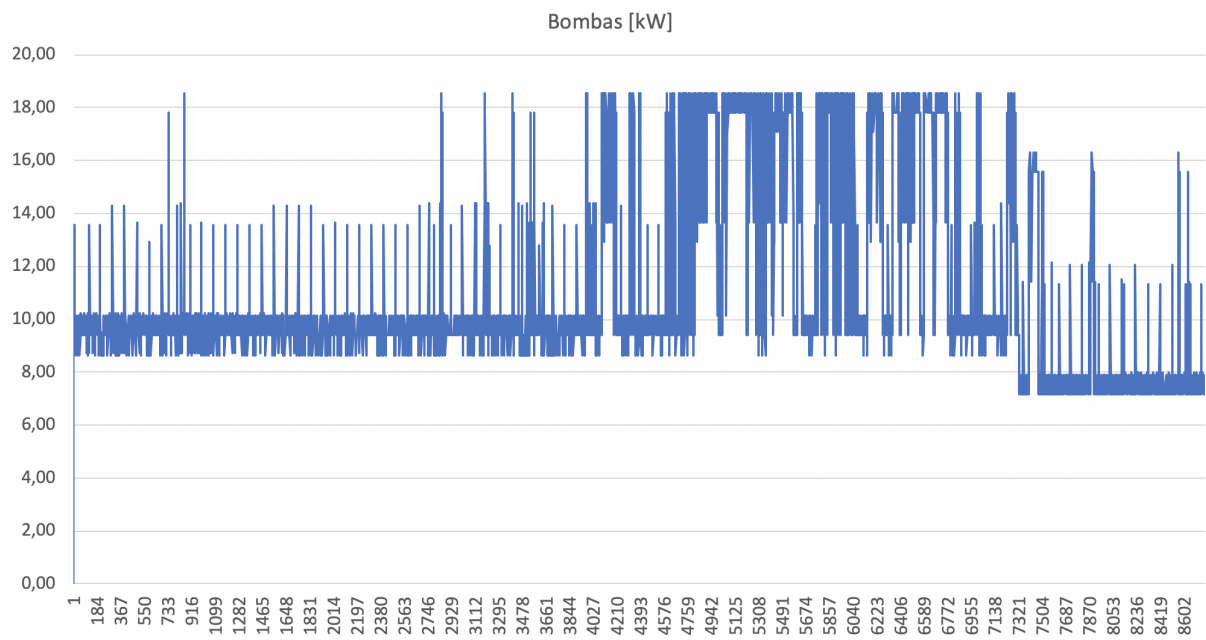


Figura E.3: Consumo anual das bombas de circulação para a simulação do sistema clássico em [kW].

Os consumos da ventilação têm a distribuição horária representada na Figura E.4.

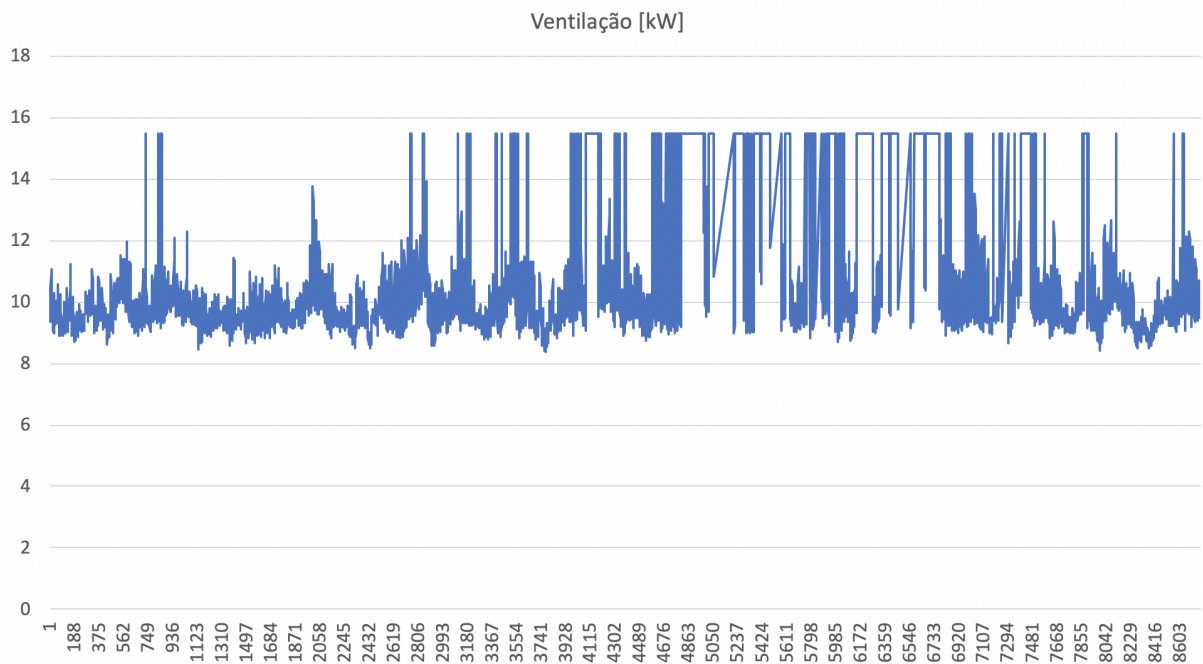


Figura E.4: Consumo anual da ventilação para a simulação do sistema clássico em [kW].

Os consumos da iluminação e dos equipamentos elétricos têm a distribuição horária representada na Figura E.5.

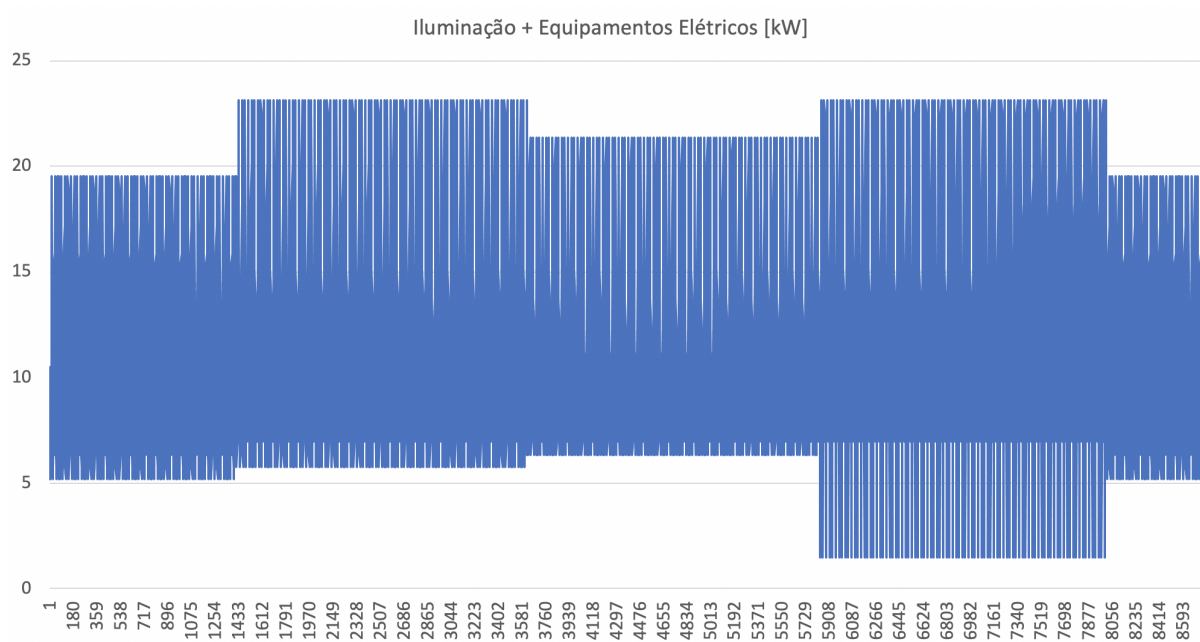


Figura E.5: Consumo anual da iluminação e dos equipamentos elétricos para a simulação do sistema clássico em [kW].

A distribuição do consumo das bombas do sistema lúdico foi feita por dia, por ser igual todos os dias, e está representada a Figura E.6

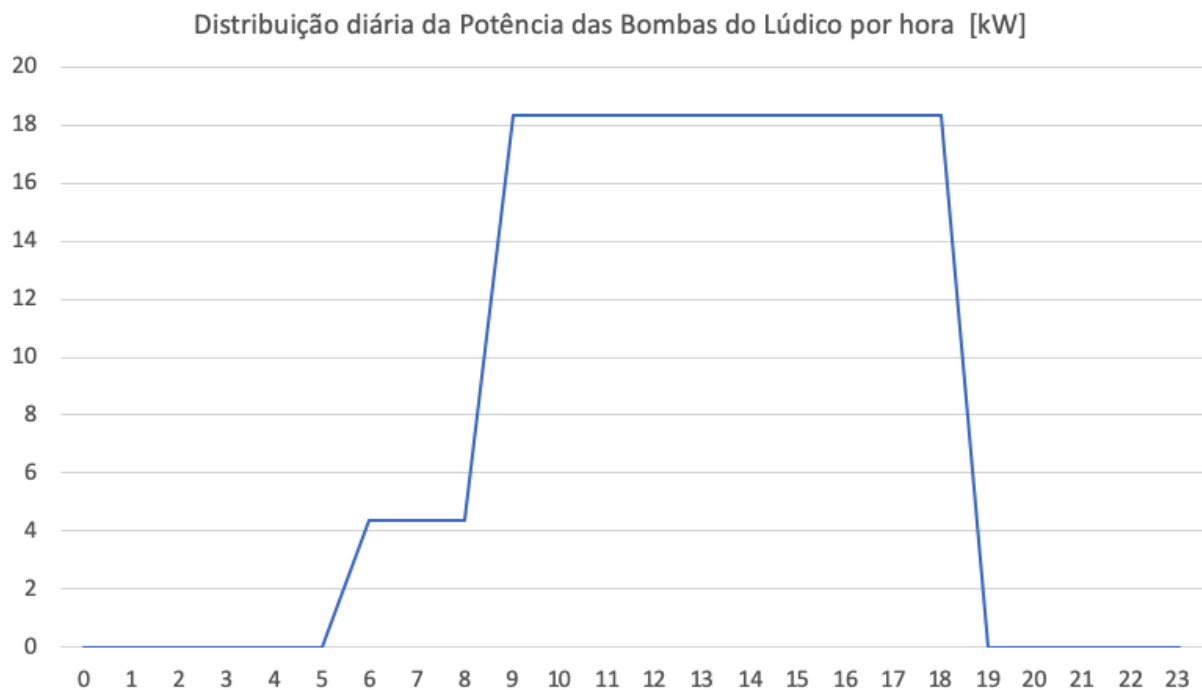


Figura E.6: Consumo diário das bombas do sistema lúdico [kW].

## E.2 Simulação do sistema com bombas de calor

Para o sistema com bombas de calor, os equipamentos considerados foram:

- Caldeira
- Bomba de Calor Ar-Ar
- Bomba de Calor Água-Água
- Bombas de Circulação
- Ventilação
- Iluminação e Equipamentos Elétricos
- Bombas para os Elementos Lúdicos

A ventilação, a iluminação e equipamentos elétricos, e as bombas do sistema lúdico não serão representados porque são iguais aos anteriores descritos na secção E.1.

A distribuição dos consumos da caldeira tem os valores apresentados na Figura E.7.

## Avaliação de Soluções de Climatização aplicadas na Hotelaria para atingir a classificação nZEB

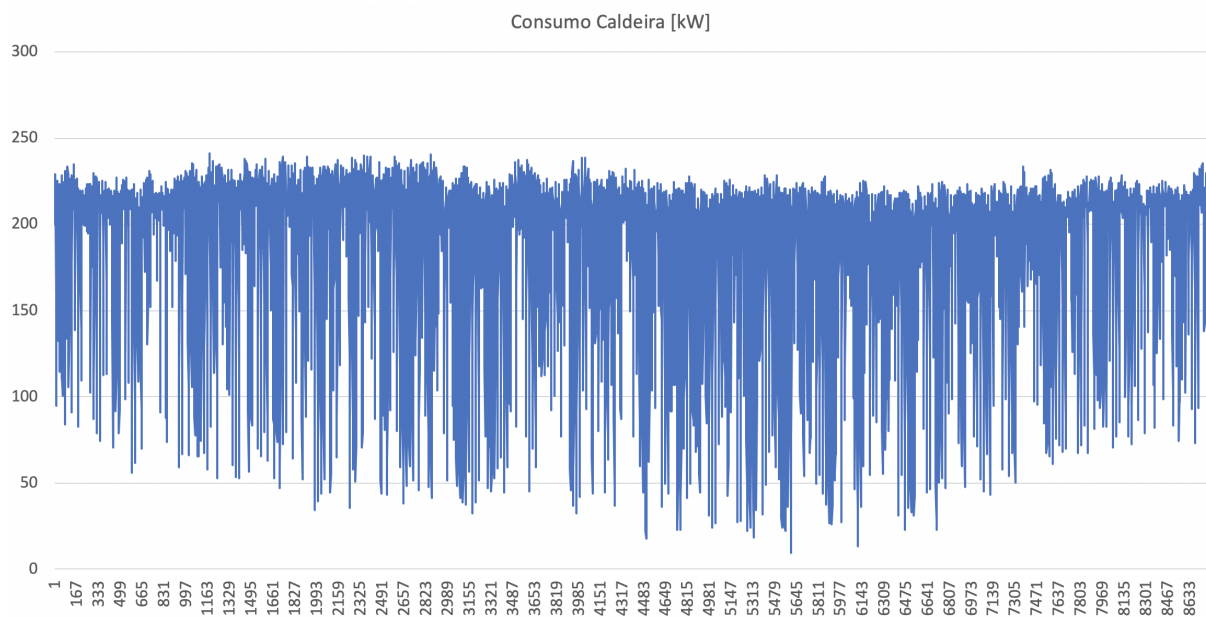


Figura E.7: Consumo anual da caldeira para a simulação do sistema com bombas de calor em [kW].

No ano considerado, os consumos da bomba de calor ar-ar têm a distribuição representada na Figura E.8.

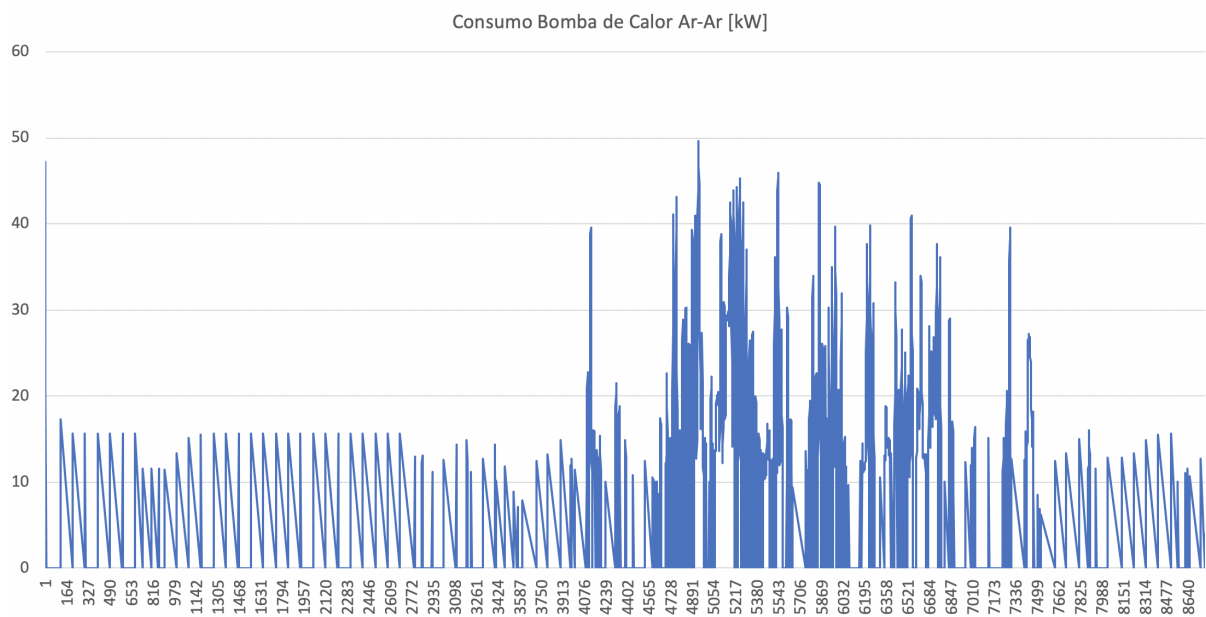


Figura E.8: Consumo anual da bomba de calor ar-ar para a simulação com bombas de calor em [kW].

Os consumos da comba de calor água-água tem a distribuição anual apresentada na Figura E.9.

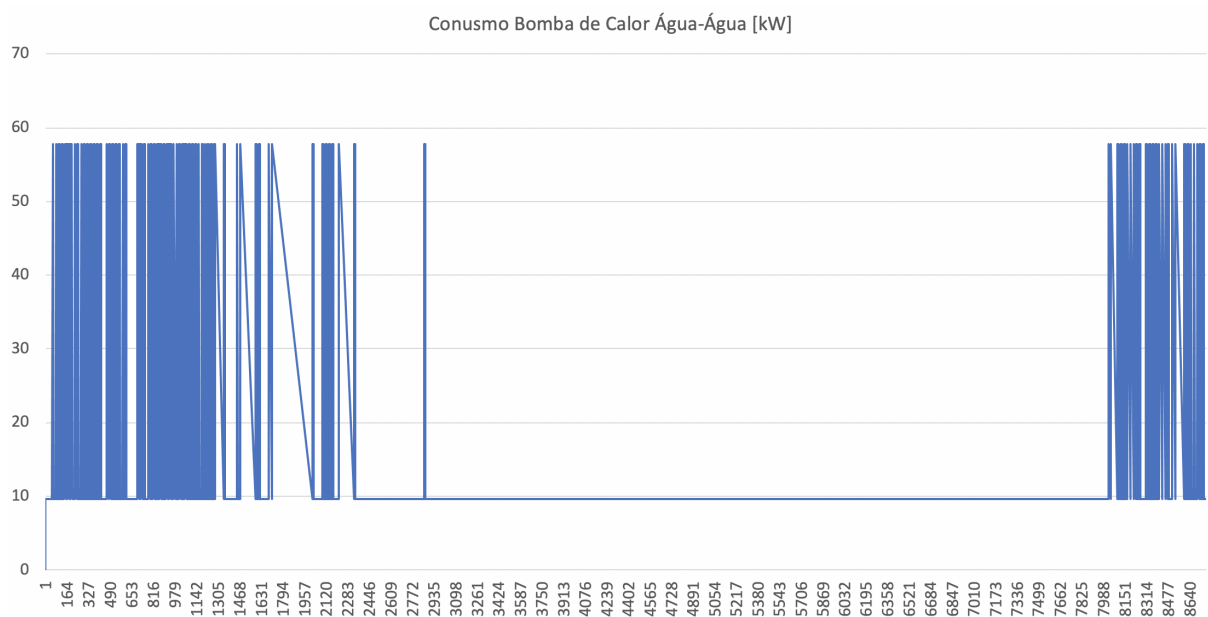


Figura E.9: Consumo anual da bomba de calor água-água para a simulação com bombas de calor em [kW].

Os consumos das bombas de circulação estão descritos na Figura E.10.

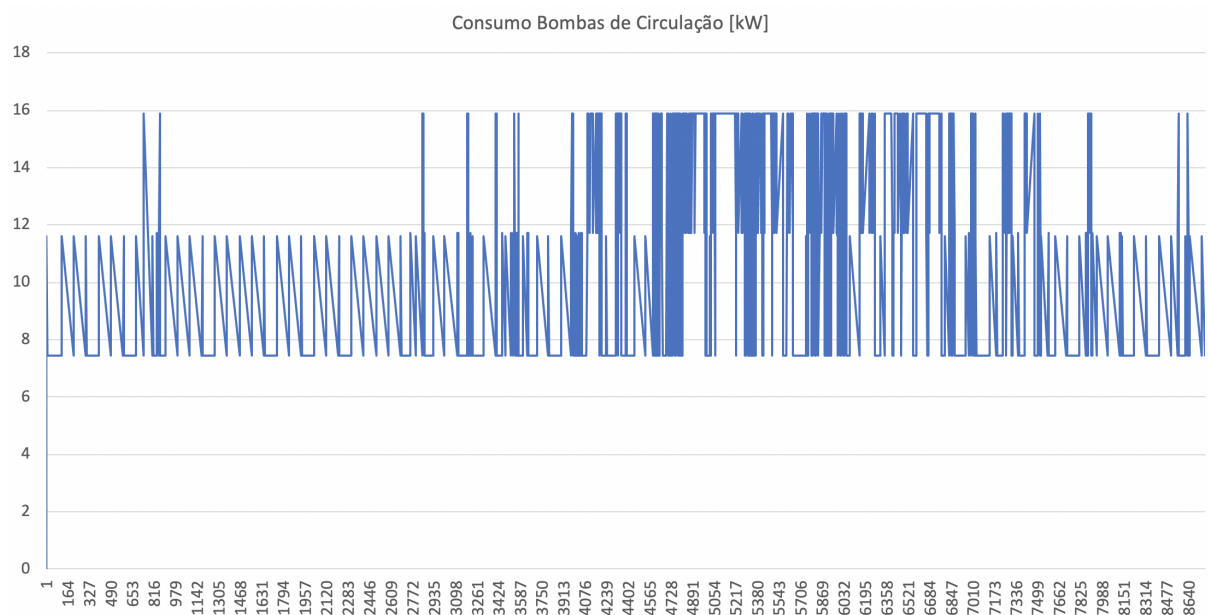


Figura E.10: Consumo anual das bombas de circulação para a simulação do sistema com bombas de calor em [kW].

### E.3 Simulação do sistema com trigeração

Para o sistema com com trigeração, os equipamentos considerados foram:

- MCI
- *Chiller* de Absorção
- Caldeira
- Bombas de Circulação
- Ventilação
- Iluminação e Equipamentos Elétricos
- Bombas para os Elementos Lúdicos

A ventilação, a iluminação e equipamentos elétricos, e as bombas do sistema lúdico não serão representados porque são iguais aos anteriores descritos na secção E.1.

Havendo cargas térmicas de arrefecimento e de aquecimento em todas as horas, o MCI ligado foi dimensionado para estar ligado sempre. A Figura E.11 mostra a distribuição do consumo do MCI, e também a sua porção térmica e elétrica.

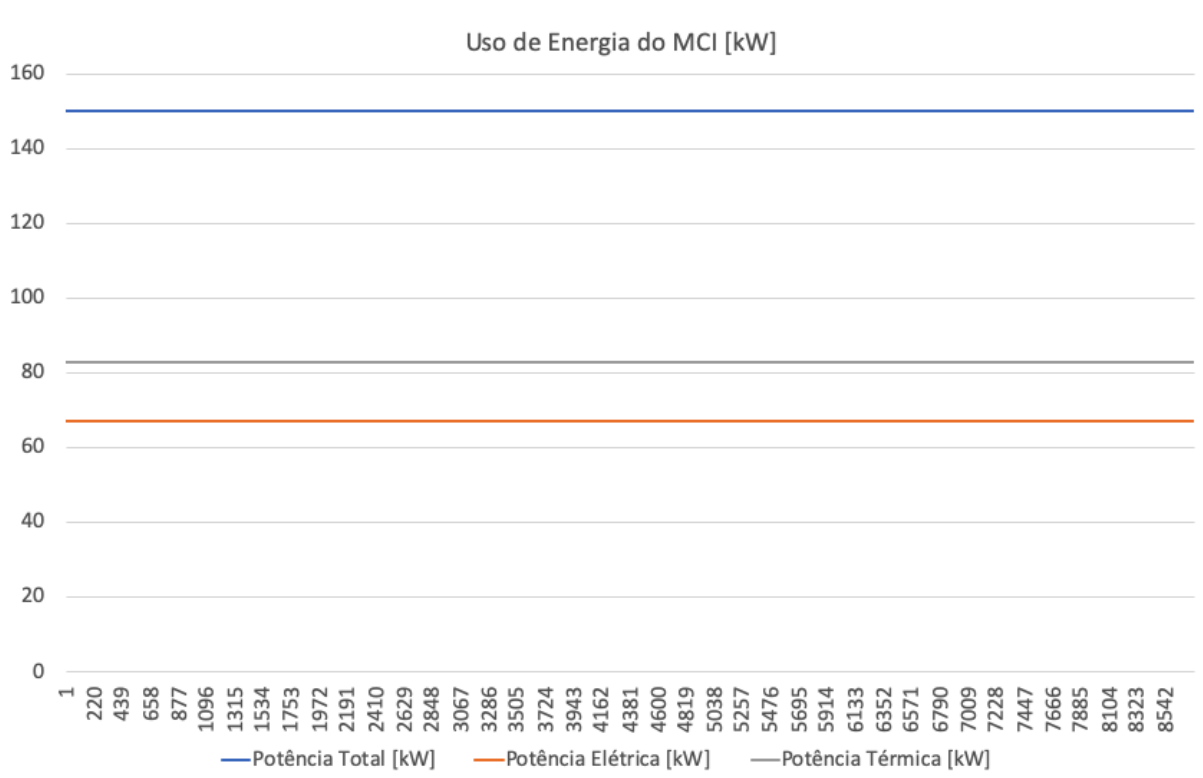


Figura E.11: Consumo anual do MCI na simulação com trigeração em [kW].

A Figura E.12 mostra a distribuição anual do uso de energia do *chiller* de absorção, que é coberta na sua totalidade pelo MCI.

Figura E.12: Consumo anual do *chiller* de absorção na simulação com trigeração em [kW].

Tal como foi explicado na secção 5.3.1, a caldeira apenas repõe a energia térmica que o MCI não consegue fornecer. Assim sendo, a distribuição do seu uso anual de energia está descrita na Figura E.13.

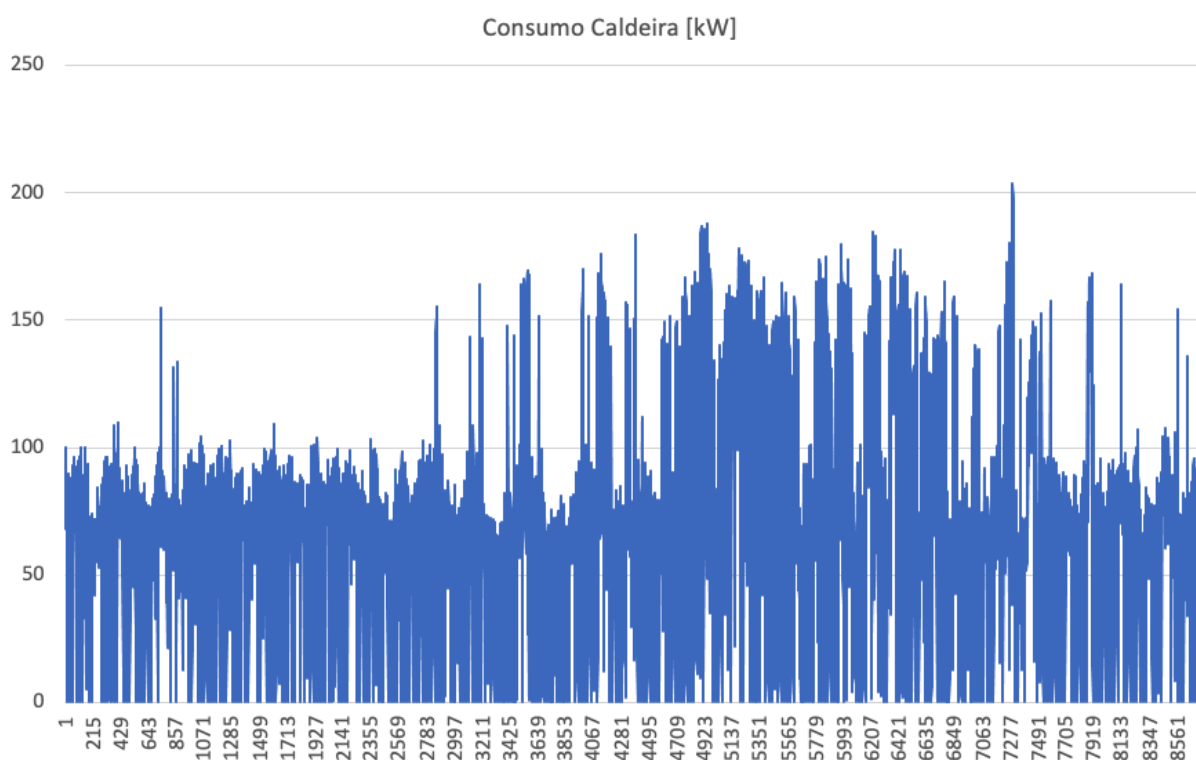


Figura E.13: Consumo anual da caldeira na simulação com trigeração em [kW].

Em relação às bombas, estas não diferem muito das simulações anteriores, porque os sistemas de ligação são parecidos. A distribuição do uso de energia anual das bombas de circulação está descrita na Figura E.14.



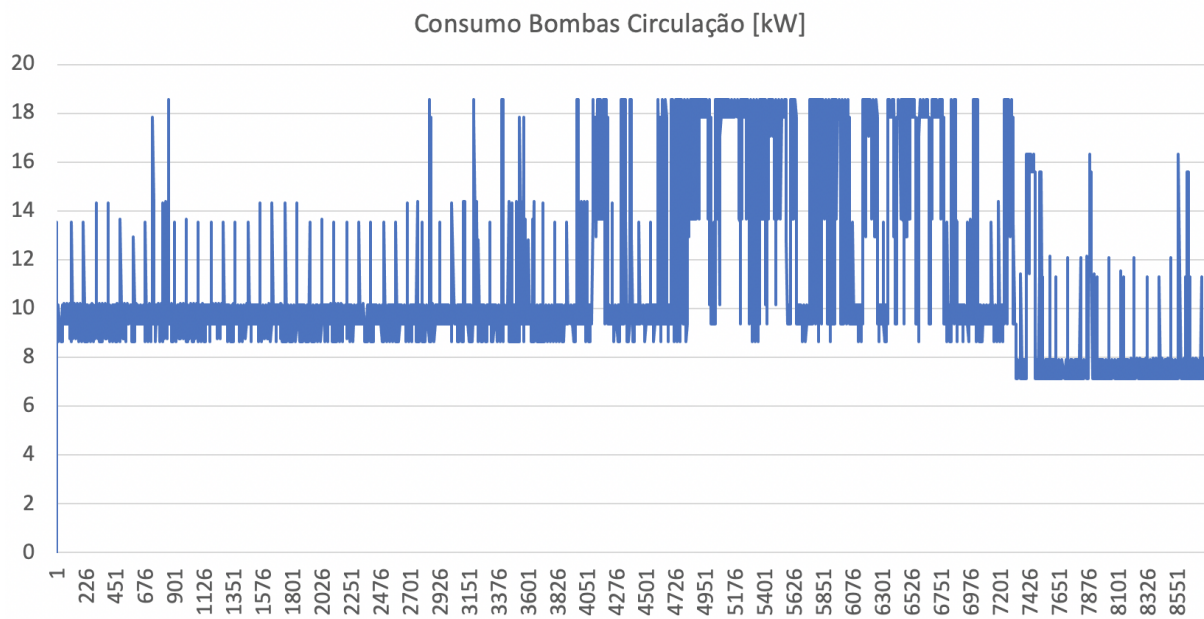


Figura E.14: Consumo anual das bombas de circulação na simulação com trigeriação em [kW].