

Reabilitação energética de um edifício de serviços para atingir a classificação nZEB

Miguel Bernardo Barreiras de Moura

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Doutor José Luís Alexandre



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Abril 2021

Resumo

Em Portugal, como em toda a Europa, tem crescido a preocupação com a pobreza energética e o seu impacto na saúde e no bem-estar das pessoas. Reabilitar e tornar os edifícios energeticamente mais eficientes permite reduzir os consumos de energia, melhorar os níveis de conforto térmico e da qualidade do ar interior e combater a pobreza energética. Em 2019, o Pacto Ecológico Europeu, “*Green Deal*” da Comissão Europeia destacou a renovação dos edifícios como um eixo fundamental para impulsionar a eficiência energética e cumprir as metas de descarbonização. Em outubro de 2020, a Comissão Europeia publicou a estratégia “Impulsionar uma Vaga de Renovação na Europa para tornar os edifícios mais ecológicos, criar emprego e melhorar as condições de vida”, tendo identificado o setor da construção como um dos maiores consumidores de energia e responsável por cerca de um terço das emissões de CO₂. Realça-se ainda o facto de, no atual contexto epidemiológico devido à doença Covid-19, existir uma maior permanência da população nas habitações, tendo os edifícios assumido um papel mais importante e as suas fragilidades tornaram-se mais evidentes. Nos dados divulgados em 2020 pelo Eurostat, Portugal consta como o quinto país da União Europeia onde as pessoas têm piores condições económicas para manter as casas devidamente aquecidas, e cerca de 20% dos portugueses estão em situação de pobreza energética.

É neste contexto que em Portugal, no início de 2021, e de modo a cumprir o artigo 2º-A da Diretiva (UE) 2018/844, é aprovada a estratégia de longo prazo de renovação energética (ELPRE), que realça a necessidade de transformar o parque edificado existente em edifícios *nearly Zero Energy Buildings* (nZEB), permitindo a redução da fatura energética e da dependência nacional de energia e contribuindo para a descarbonização, pelo que é uma medida crucial para que Portugal consiga atingir os objetivos a que se propôs no âmbito do Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030) e do Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC2050).

Tendo presente este enquadramento, neste trabalho analisa-se o desempenho energético de um edifício de saúde com internamento, classificado como um edifício de serviços pertencente à Santa Casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim, avaliando-se o impacto da implementação de algumas medidas de melhoria. A análise de desempenho energético do edifício em estudo e a avaliação do impacto das medidas de melhoria propostas, são suportadas pela utilização do software TRNSYS. Foi ainda avaliada, quer a viabilidade económica da implementação das medidas de reabilitação energética propostas, quer as prioridades do investimento, através de um modelo de otimização linear, procedendo-se também à verificação das alterações necessárias para que o edifício atinja o estatuto de nZEB.

O trabalho desenvolvido permitiu a caracterização e validação do modelo energético do edifício do Pensionato da Santa Casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim, tendo-se avaliado um conjunto de medidas que contribuem para melhoria significativa da sua eficiência energética, cuja implementação é mais um passo na direção da sustentabilidade energética.

Palavras-Chave: Eficiência energética, nZEB, TRNSYS

Abstract

In Portugal, as in all of Europe, there has been a growing concern about energy poverty and its impact on people's health and well-being. Rehabilitating and making buildings more energy efficient allows for the reduction of energy consumption, improved levels of comfort and interior quality, and it helps to combat energy poverty. In 2019, the European Ecological Pact, the "Green Deal", made by European Commission highlighted the renovation of buildings as a fundamental measure necessary to boost energy efficiency and meet decarbonisation goals. Therefore, in October 2020, the European Commission published the strategy "Boosting Wave in Europe to make buildings more environmentally friendly, create jobs and improve living conditions" having identified the construction sector as one of the largest consumers of energy and responsible for a third of carbon dioxide emissions globally. It is also highlighted the fact that in the current epidemiological context, due to the COVID-19 pandemic, that there is a greater permanence at home, meaning that buildings are having and will continue to have an important role in people's lives. Moreover, their weaknesses have become more evident. In data released in 2020 by Eurostat, Portugal is the fifth lowest ranking country in the European Union where people have poorer economic conditions than desirable in order to keep their houses properly heated, and about 20% of the Portuguese people are in an energy poverty situation.

It is in this context, that in Portugal at the beginning of 2021, in order to comply with the 2nd article of Directive (EU) 2018/844, the long-term energy renewal strategy (ELPRE) is approved, which highlights the need to transform the existing buildings into nearly Zero Energy Buildings (nZEB). The renovation of the existing buildings allows reduction of energy bills and the national dependence on energy contributing to the decarbonization, so it is crucial for Portugal to achieve the energy and climate objectives that are proposed under the National Energy and Climate Plan 2021-2030 (PNEC 2030) and the Roadmap for Carbon Neutrality (RNC2050).

Within the scope of this work, the energy performance of a health building with internment facilities is analyzed, belonged to Santa Casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim is analyzed, evaluating the impact of implementing some of the document reference improvement measures. Both the economic viability of implementing the proposed energy rehabilitation measures and the investment priorities were assessed through a linear optimization model, with the necessary changes being verified for the building to reach nZEB status. The work carried out allowed the characterization and the validation of the energy model of Pensionato da Santa Casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim, having been evaluated a set of measures that contribute to a significant improvement in the energy efficiency of the building whose implementation is a step in the right direction of energy sustainability.

Keywords: Energy efficiency, nZEB, TRNSYS

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor Doutor José Luís Alexandre, pela oportunidade de realizar esta dissertação, pelo apoio e disponibilidade prestados ao longo de todo o processo, e ainda pela explicação do programa de simulação.

Sem este projeto não teria a oportunidade de fazer um trabalho de simulação tão interessante.

Agradeço, também, a todos os colaboradores da Santa Casa da misericórdia pela disponibilidade e ajuda sempre que necessário, e pelo acompanhamento de perto deste projeto.

Um especial agradecimento ao Provedor Virgílio Ferreira pela oportunidade, disponibilidade sempre presente e auxílio ao longo de todo o trabalho.

Quero também agradecer ao Engenheiro António José Pereira por me dar a conhecer este projeto e me apresentar a direção da Santa Casa da Misericórdia, a qual me propôs a realização deste 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. Em especial à minha mãe pela ajuda oferecida na revisão da dissertação e no modelo de otimização.

Miguel Moura

Índice de Conteúdos

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	11
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	13
1.3	METODOLOGIA.....	13
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	14
2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	15
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	15
2.2	PANORAMA ENERGÉTICO	15
2.2.1.	<i>No mundo.....</i>	<i>16</i>
2.2.2.	<i>Na União Europeia</i>	<i>19</i>
2.2.3.	<i>Em Portugal</i>	<i>21</i>
2.3	POLÍTICAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA O SETOR EDIFICADO	25
2.3.1	<i>Regulamentação comunitária</i>	<i>25</i>
2.3.2	<i>Legislação nacional.....</i>	<i>27</i>
3	EDIFÍCIOS NZEB.....	30
3.1	INTRODUÇÃO	30
3.2	CONCEITO DE NZEB (<i>NET ZERO ENERGY BUILDING</i>)	31
3.3	CONCEITO DE NZEB (<i>NEARLY ZERO ENERGY BUILDING</i>)	32
3.4	EVOLUÇÃO DO CONCEITO NZEB NA UNIÃO EUROPEIA	33
3.4.1	<i>Situação em Portugal</i>	<i>35</i>
4	CASO DE ESTUDO.....	38
4.1	DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO	38
4.2	DADOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO	41
4.3	CARATERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO	45
4.3.1.	<i>Envolvente</i>	<i>45</i>
4.3.2.	<i>Vãos envidraçados.....</i>	<i>47</i>
4.3.3.	<i>Inercia térmica</i>	<i>48</i>
4.3.4.	<i>Equipamentos de climatização</i>	<i>49</i>
4.3.5.	<i>Outros dados relevantes para o consumo energético do edifício.....</i>	<i>49</i>
4.3.6.	<i>Consumos de Água Quente Sanitária (AQS)</i>	<i>51</i>
4.4	DESEMPENHO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO	52
4.4.1	<i>Necessidades térmicas.....</i>	<i>52</i>
4.4.2	<i>Consumos anuais de energia</i>	<i>56</i>
5	MEDIDAS DE MELHORIA	59
5.1	REDUÇÃO DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS PELA MELHORIA DA ENVOLVENTE	60
5.1.1	<i>Envolvente Opaca</i>	<i>60</i>
5.1.2	<i>Envolvente Não Opaca.....</i>	<i>62</i>
5.2	INSTALAÇÃO DE SISTEMA DE ILUMINAÇÃO MAIS EFICIENTE	67
5.3	MELHORIA DA EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS TÉCNICOS	71
5.3.1	<i>Substituição das caldeiras por caldeiras de condensação a gás natural</i>	<i>71</i>
5.3.2	<i>Substituição das caldeiras por caldeiras a biomassa</i>	<i>74</i>
5.3.3	<i>Substituição das caldeiras por bombas de calor.....</i>	<i>75</i>
5.3.4	<i>Análise comparativa das diferentes propostas de equipamentos técnicos</i>	<i>78</i>
5.4	IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS COM RECURSO A FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL.....	79
5.4.1	<i>Sistema solar térmico</i>	<i>79</i>
5.4.2	<i>Sistema Fotovoltaicos</i>	<i>80</i>
5.5	INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE ARREFECIMENTO	81
5.6	IMPACTO DAS MEDIDAS DE MELHORIA	82
5.6.1	<i>Requisitos nZEB.....</i>	<i>86</i>
6	VIABILIDADE ECONÓMICA	89
6.1	MÉTODO DOS FLUXOS DE CAIXA DESCONTADOS.....	89

6.2	MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR	91
6.2.1	<i>Modelo Matemático</i>	92
6.2.2	<i>Análise da Solução</i>	94
7	CONCLUSÕES	97
7.1	TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS	100
	ANEXO A - CÁLCULO DA INÉRCIA TÉRMICA	104
	ANEXO B - ZONAS TÉRMICAS	107
	ANEXO C - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS	108
	ANEXO D - ROTINAS DO SOFTWARE TRNSYS	109
	ANEXO E - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES	110
	ANEXO F - RESULTADOS DOS FLUXOS DE CAIXA DESCONTADOS	121
	ANEXO G - MODELO DE OTIMIZAÇÃO (SOLVER)	122

Índice de Figuras

Figura 2.1- Consumo de energia no mundo, em Mtoe, [16]	16
Figura 2.2 - Fornecimento de energia total no mundo, por tipos de energia, em Ktoe [17]	17
Figura 2.3 - Emissão de CO ₂ no mundo, em MtCO ₂ [16]	17
Figura 2.4 - Consumo de energia final por setor de atividade económica, em Ktoe [17]	18
Figura 2.5 - Taxa de eficiência energética [17]	18
Figura 2.6 - Fornecimento de energia total na EU-28, por tipos de energia, em Ktoe [17]	19
Figura 2.7 - Evolução das emissões de CO ₂ na UE, em MtCO ₂ [17]	20
Figura 2.8 - Evolução da dependência energética de Portugal [21]	21
Figura 2.9 - Fornecimento de energia primária em Portugal, por tipos de energia, em Ktoe [17] ...	22
Figura 2.10 - Fornecimento de energia de fontes renováveis, por tipo de energia, em TWh [21]....	22
Figura 2.11 - Análise das fontes de energia renovável nos vários países da UE-27 [21]	23
Figura 2.12 -Consumo de energia final por setor de atividade económica, em Ktoe [21]	24
Figura 2.13 - Evolução das emissões de CO ₂ em Portugal, em MtCO ₂ [17]	24
Figura 2.14 - Cronologia da legislação nacional, adaptada [49]	28
Figura 3.1 - Representação esquemática do balanço energético nulo, adaptado [31]	31
Figura 3.2 - Representação das ações para atingir um balanço energético nulo, adaptado [14, 31]	32
Figura 3.3 - Representação de balanço energético quase nulo, adaptado [31].....	33
Figura 3.4 - Cronograma para implementação da diretiva EPBD, adaptado [32]	34
Figura 3.5 - Cronograma de evolução da legislação europeia relativa aos nZEB	36
Figura 4.1-Imagem da Santa Casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim obtida por satélite (Google maps)	39
Figura 4.2- Imagens do interior do edifício do Pensionato da SCMPVarzim	40
Figura 4.3 - Imagem do edifício da estrutura residencial para idosos da SCMPVarzim (Google maps)	41
Figura 4.4 Mapa da localização do edifício em estudo - Póvoa do varzim.....	41
Figura 4.5- Gráfico da distribuição da dispersão das temperaturas anuais em (°C) para os dados climáticos do Porto calculados através do <i>Climate Consultant</i>	42
Figura 4.6 - Mapa das zonas climáticas de inverno (esquerda) e verão (direita) [43]	43
Figura 4.7 - Dados climáticos para a localização do edifício e zonas climáticas da Póvoa do Varzim (DGEG).....	44

Figura 4.8 - Temperaturas mensal média, mínima e máxima (°C) da Povia do Varzim (DGEG)	44
Figura 4.9 - Irradiação solar mensal média diária (KWh/m ²) na Povia do Varzim (DGEG)	45
Figura 4.10 - Caldeiras na central térmica da santa casa da Misericórdia da Povia do Varzim.....	49
Figura 4.11 - Densidade ocupacional de referência para estabelecimento de saúde com internamento [47]	50
Figura 4.12 - Dados de referência para iluminação de um estabelecimento de saúde com internamento [47]	51
Figura 4.13 - Modelo geométrico 3D do edifício do Pensionato	53
Figura 4.14 - Variação diária da energia de aquecimento do edifício, obtidos pelo TRNSYS em kWh	54
Figura 4.15 - Energia de aquecimento mensal obtido pelo TRNSYS em kWh.....	55
Figura 4.16 - Energia mensal para arrefecimento obtidos pelo TRNSYS em kWh.....	55
Figura 4.17 - Comparação das necessidades térmicas anuais de aquecimento e arrefecimento	56
Figura 4.18 - Consumos de energia por tipo de utilização	57
Figura 4.19 - Consumos por forma de energia	58
Figura 5.1 - Orientações com requisitos ao nível do fator solar dos envidraçados [56]	63
Figura 5.2 - Layout do software <i>Berkeley Lab WINDOW</i>	64
Figura 5.3 - Gráfico de temperaturas do ar interior para as diferentes zonas térmicas	65
Figura 5.4 - Gráfico das necessidades térmicas de aquecimento das diferentes zonas térmicas.....	65
Figura 5.5 - Gráfico de temperaturas do ar interior para as diferentes zonas térmicas	69
Figura 5.6 - Gráfico das necessidades térmicas de aquecimento das diferentes zonas térmicas.....	70
Figura 5.7 - Caldeiras convencionais versus caldeiras de condensação [62]	72
Figura 5.8 Processo de funcionamento de uma bomba de calor [65]	76
Figura 5.9 - Comparação dos consumos energéticos dos equipamentos técnicos para aquecimento e AQS	78
Figura 5.10 - Funcionamento de um <i>chiller</i> de climatização [66]	81
Figura 5.11 - Custos de investimento das medidas de melhoria (€)	83
Figura 5.12 - Redução anual dos custos de energia das medidas de melhoria (€).....	83
Figura 5.13 - Período de retorno das medidas de melhoria (anos)	84
Figura 5.14 - Valor do indicador de desempenho energético (kW _{EP} /ano)	85
Figura 5.15 - Valor do R _{IEE} das medidas de melhoria.....	86
Figura 6.1 - Comparação das soluções do problema de otimização, redução de custos	95

Figura 6.2 - Comparação das soluções do problema de otimização, período de retorno	95
--	----

Índice de Tabelas

Tabela 3.1- Princípios da definição de nZEB, adaptado de [41]	35
Tabela 3.2 - Valores máximos de <i>IEES</i> e <i>RIEE</i> em função do contexto do edifício	37
Tabela 4.1 - Resumo das características gerais do edifício Pensionato da SCMPVarzim.....	40
Tabela 4.2- Critérios para a determinação da zona climática de inverno [43]	43
Tabela 4.3 - Critérios para a determinação da zona climática de verão [43].....	43
Tabela 4.4- Propriedades dos materiais das soluções construtivas da parede exterior	46
Tabela 4.5 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas no piso exterior	46
Tabela 4.6 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas na cobertura exterior	46
Tabela 4.7 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas na parede interior ...	47
Tabela 4.8 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas no teto interior	47
Tabela 4.9 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas no pavimento interior	47
Tabela 4.10 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas nos vãos envidraçados	48
Tabela 4.11 - Classes de inércia térmica, <i>It</i> [46].....	48
Tabela 4.12 - Dados do RECS para estabelecimentos de saúde com internamento	50
Tabela 4.13 - Características do equipamento de iluminação.....	51
Tabela 4.14 - Consumo de AQS anuais	52
Tabela 4.15 - Consumos energéticos obtidos com simulação no TRNSYS	54
Tabela 4.16 - Consumos anuais do edifício Pensionato.....	57
Tabela 4.17 - Estimativa dos custos atuais com energia com aplicação das medidas	58
Tabela 5.1 - Pacote de medidas de melhoria passivas ao nível da envolvente [30]	60
Tabela 5.2 - Valores do coeficiente de transmissão térmica máximo admissível para a envolvente opaca e envidraçada exterior de edifícios de comércio e serviços para a região climática I1 ($Wm^2°C$), adaptado de [45].....	61
Tabela 5.3 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas da parede exterior	61
Tabela 5.4 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas da cobertura exterior	62
Tabela 5.5 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas da laje de pavimento	62
Tabela 5.6-Propriedades do vão envidraçado propostos	64
Tabela 5.7 - Propriedades dos elementos construtivos da envolvente.....	64

Tabela 5.8-Necessidades térmicas de arrefecimento e aquecimento do edifício com melhoria da envolvente	65
Tabela 5.9 - Consumo de gás natural com melhoria da envolvente	66
Tabela 5.10 - Poupanças energéticas e de custos da medida de melhoria da envolvente	67
Tabela 5.11 - Consumos energéticos da medida de melhoria do sistema de iluminação	68
Tabela 5.12-Necessidades térmicas de aquecimento resultantes da medida de melhoria do sistema de iluminação	68
Tabela 5.13 - Consumos anuais do edifício Pensionato com a medida de melhoria do sistema de iluminação	69
Tabela 5.14 - Poupanças energéticas e de custos da medida de melhoria do sistema de iluminação	70
Tabela 5.15 - Custos e consumos energéticos da caldeira de condensação a gás natural para aquecimento.....	73
Tabela 5.16 - Custos e consumos energéticos da caldeira de condensação a gás natural para AQS .	73
Tabela 5.17- Período de retorno da substituição da caldeira de aquecimento.....	73
Tabela 5.18- Período de retorno da substituição da caldeira de AQS.....	74
Tabela 5.19- Custos e consumos energéticos da caldeira de biomassa para aquecimento	74
Tabela 5.20- Custos e consumos energéticos da caldeira de biomassa para AQS	75
Tabela 5.21- Período de retorno da substituição da caldeira de aquecimento.....	75
Tabela 5.22- Período de retorno da substituição da caldeira de aquecimento.....	75
Tabela 5.23- Custos e consumos energéticos da bomba de calor para aquecimento.....	77
Tabela 5.24- Custos e consumos energéticos da bomba de calor para AQS.....	77
Tabela 5.25- Período de retorno da substituição da caldeira de aquecimento.....	77
Tabela 5.26- Período de retorno da substituição da caldeira de AQS.....	78
Tabela 5.27 - Energia produzida e consumos do sistema solar térmico.....	79
Tabela 5.28 - Período de retorno do sistema solar térmico	79
Tabela 5.29 - Energia produzida e consumos do sistema de painéis fotovoltaicos.....	80
Tabela 5.30 - Período de retorno da instalação de sistema de painéis fotovoltaicos	80
Tabela 5.31 - Consumos energéticos anuais de diferentes equipamentos de arrefecimento.....	82
Tabela 5.32 - Custos dos diferentes equipamentos de arrefecimento	82
Tabela 5.33 - Valores utilizados para o cálculo da classe energética	85
Tabela 5.34 - Consumos de energia útil com aplicação simultânea das medidas de melhoria.....	87
Tabela 5.35 - Energia produzida e consumos do sistema de fonte renovável.....	88

Tabela 5.36 - Custos e redução anual do custo de energia dos sistemas de fonte renovável	88
Tabela 6.1 - Investimento das medidas de melhoria.....	90
Tabela 6.2- Viabilidade do projeto de investimento.....	90
Tabela 6.3 - Caracterização das medidas de melhoria	92
Tabela 6.4 - Soluções obtidas do problema de otimização	94

Nomenclatura

AQS	Água quente sanitária
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BPIE	<i>Buildings Performance Institute Europe</i>
BREEAM	<i>Building Research Environmental Assessment Method</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EED	Diretiva de Eficiência Energética
ELPRE	Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
ETCIS	<i>External Thermal Insulation Composite Systems</i>
IEA	<i>Internacional Energy Agency</i>
IEE	Indicador de Eficiência Energética
IVA	Imposto de Valor Acrescentado
FMI	Fundo Monetário Internacional
GES	Grande edifício de serviços
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LNEG	Laboratório Nacional de energia e Geologia
NZEB	<i>Net Zero Energy Building</i>
nZEB	<i>nearly Zero Energy Building</i>
PNEC	Plano Nacional Energia e Clima
PRS	Período e retorno
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RNC 2050	Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
SCMPVarzim	Santa Casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim
TIR	Taxa Interna de Retorno
TRNSYS	<i>Transient System Simulation</i>
UE	União Europeia
VAL	Valor Atualizado Líquido

Símbolos Romanos

- A_i - Área útil de pavimento (m^2)
- A_p - Designa a área interior útil de pavimento, (m^2)
- C_{aqs} - Representa o consumo anual de AQS, (l/ano)
- $E_{ren,i}$ - Designa a produção de energia a partir de fontes de origem renovável para consumo, por fonte de energia i , (kWh/ano)
- $E_{s,i}$ - Representa o consumo de energia por fonte de energia i para usos do tipo S, (kWh/ano)
- F_f - Fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado, compreendendo pelas verticais, outros corpos ou partes do edifício (estação de arrefecimento)
- F_o - Fator de sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes ao envidraçado, compreendendo palas e varandas (estação de arrefecimento)
- $F_{pu,i}$ - Representa o fator de conversão de energia útil para energia primária para a fonte de energia i , (kWh_{EP}/kWh)
- g_T - Fator solar global do vão envidraçado com todos os dispositivos de proteção solar, permanentes ou móveis totalmente ativados
- k - Condutibilidade térmica, (W/mK)
- M_{si} - Massa superficial do elemento i (kg/m²)
- N_{aq} - Necessidades térmicas de aquecimento em (kWh/ano)
- N_{comb} - Consumo de combustível em (kWh/ano)
- Q_a - Representa a energia global necessária para a preparação de AQS, (kWh/ano)
- r - Fator de redução da massa superficial útil, com valores entre 0 e 1
- R_{se} - Resistência térmica superficial exterior, (m²°C/W)
- R_{si} - Resistência térmica superficial interior, (m²°C/W)
- R_{th} - Resistência total térmica (m²°C/W)
- U - Coeficiente de transmissão térmica, (W/m². °C)
- S_i - Área de superfície interior do elemento i (m²)

Símbolos Gregos

- ΔT - Aumento de temperatura necessário à preparação de AQS (°C)
- η_{cald} - Representa o rendimento da caldeira
- ρ - Massa volúmica, (kg/m³)

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

Vivemos tempos difíceis, em termos sanitários, políticos, sociais, e sobretudo económicos. A epidemia global criada pelo novo coronavírus, que atingiu praticamente todos os países do mundo e obrigou mais de metade da população mundial (52%) a ficar confinada em suas casas no 1º trimestre de 2020 [1], resultou numa crise sem precedentes, nos últimos 50 anos, cujos efeitos ainda estão longe de se apurar.

Destruição de emprego, saturação dos serviços de saúde, falências de empresas, aumento da mortalidade, recessão económica, retração social, restrições à livre circulação, etc. Mas também surgem oportunidades. A redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e de dióxido de nitrogénio, a recuperação do ambiente e da natureza, e para o que interessa para este trabalho, a maior utilização humana do edificado, numa situação de resgate dos valores da família, e da empresa, bem como da convivência real.

Hoje em dia, os edifícios são vistos como uma parte essencial da transição necessária para o desenvolvimento sustentável energético. Tal deve-se ao facto de o sector edificado ser consumidor de 30% a 40% do mercado energético mundial [2], [3]. Estima-se que nos Estados Unidos e na Europa, os edifícios comerciais e residenciais consumam 40% de energia primária e da energia relacionada com emissões de dióxido de carbono, do total de toda a energia primária consumida nos vários setores da economia, [4],[5].

No sentido de reduzir a dependência da energia primária no setor de edifícios, diversas políticas foram promovidas e implementadas por todo o mundo, com base em tecnologias de poupança de energia e de utilização de energias renováveis. Os estudos que fundamentam estas políticas tiveram início na década de 70 do século passado, quando a gestão e a construção de edifícios, contemplando diferentes soluções energéticas, começou a ser reconhecida como uma medida eficaz no combate ao aquecimento global, à poluição do ar e à segurança energética [6]. Posteriormente, as políticas públicas promoveram a aprovação de regulamentos térmicos para edifícios, bem como técnicas de arquitetura solar passiva, medidas essas que continuam a ser implementadas até aos dias de hoje.

Na União Europeia (UE) a diretiva do desempenho energético nos edifícios (EPBD) aprovada em 2002 [7], veio impor aos Estados-Membros, que todos os edifícios novos ou reabilitados, colocados no mercado de venda ou arrendamento, deveriam possuir uma avaliação de desempenho energético e o respetivo certificado, sendo este de referência obrigatória na publicidade aos mesmos, efetuada pelas empresas de mediação imobiliária. Esta diretiva foi mais tarde substituída por uma diretiva reformulada aprovada em maio de 2010 [3], que estabeleceu a obrigação de outros requisitos mínimos para um melhor desempenho energético dos edifícios, designadamente o uso de painéis solares, sempre que haja condições para tal, destinados ao aquecimento de águas nos edifícios residenciais. Ainda assim, outras ferramentas com o intuito de aumentar a eficiência energética e a integração de tecnologias de energia renovável foram sendo desenvolvidas em vários países, destacando-se o conceito de *design da Passivhaus* na Alemanha [8], o BREEAM (*Building Research Environmental Assessment Method*) no Reino Unido, [9] o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) nos Estados Unidos [10] e também na Coreia do Sul onde o governo apresentou medidas para o desenvolvimento de cidades e edifícios verdes em 2009 [11]. A diretiva EPBD [3] bem como a diretiva de eficiência energética (EED) de 2012 [12] foram revistas em 2018, de modo a permitir a concretização do objetivo da UE, conduzindo a transição para energia limpa.

Com a publicação da diretiva EPBD [3] relativa ao desempenho energético dos edifícios, é efetuada em Portugal a transposição para o direito interno através do Decreto-Lei n.º 118/2013[13], o qual substitui todos os anteriores diplomas legais sobre a matéria, agregando

num único documento toda a legislação que ainda se encontrava dispersa. Assim, com a publicação deste decreto-lei, são aprovados o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Em dezembro de 2020, ou seja, já durante o desenvolvimento deste trabalho, foi publicado o Decreto-Lei n.º 101-D/2020 [35] que veio definir os requisitos a aplicar nos edifícios novos e existentes sujeitos a renovações, para a melhoria do seu desempenho energético, registando-se também alterações ao SCE. Com a publicação deste novo enquadramento legal são transpostas para a legislação nacional, as alterações às diretivas 2010/31/UE [3], 2012/27/UE [12], de acordo com a diretiva 2018/844/UE [25].

Portugal, para cumprir os objetivos de aumento da eficiência energética, redução das emissões de CO₂, e redução do consumo de energia primária, de acordo com as orientações da diretiva 2018/844/UE [25], aprovou o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC) [22] e o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC) [29]. A renovação dos edifícios foi identificada como um vetor de ação fulcral para que os objetivos da descarbonização fossem atingidos [3], [25]. Os edifícios residenciais e não residenciais surgem como um dos maiores consumidores de energia em grande parte devido à ineficiência energética, pelo que, um parque de edifícios renovado é fundamental para a obtenção de um sistema de energia limpo e descarbonizado, uma vez há uma relação direta entre o estado de conservação e o desempenho energético. Por outro lado, Portugal apresenta-se como dos piores países europeus no que respeita à pobreza energética devido à ineficiência energética dos edifícios, à qual se juntam outros fatores como os baixos rendimentos, a utilização de equipamentos de climatização de baixa eficiência, e o baixo consumo de energia para aquecimento e arrefecimento devido aos custos elevados da mesma.

O desafio de reabilitar o parque habitacional do país torna-se ainda maior num contexto de crise económica associada à pandemia de Covid-19. No atual contexto de situação epidemiológica, há uma maior permanência nas habitações, inclusive em contexto laboral, pelo que o conforto no interior dos edifícios passou a ser um requisito crucial. Em Portugal, uma parte significativa do parque edificado nacional encontra-se envelhecida e a necessitar de intervenções de renovação, pelo que transformar os edifícios existentes em edifícios mais eficientes em termos de energia e com um melhor desempenho energético, é a estratégia a seguir de forma a dar resposta ao compromisso assumido no âmbito do RNC 2050 [29].

A Estratégia de Longo Prazo de Renovação de Edifícios (ELPRE) [30] aprovada já durante o corrente ano de 2021, surge para cumprir o estipulado no artigo 2º-A da Diretiva (UE) 2018/844 [25], que determina a obrigação de cada Estado-Membro desenvolver uma estratégia de longo prazo para apoiar a renovação dos edifícios, e converter o parque edificado num parque descarbonizado e de elevada eficiência energética. Por tal motivo, é necessário intervir e renovar o parque de edifícios de modo a dar resposta, não apenas às questões da eficiência energética, mas as outras questões relevantes que lhe estão associadas, tais como o aumento do conforto térmico, o combate às emissões de carbono e o aumento da qualidade do ar interior, para citar apenas algumas [30].

De acordo com os dados da ADENE e como é referido na ELPRE os edifícios não residenciais, e em particular os do setor público, são os que apresentam pior desempenho energético, nomeadamente os destinados a atividades em que há contacto direto com as pessoas, como é o caso dos destinados a escolas, lares, unidades de saúde e recintos de desporto, entre outros. Por isso, renovar e tornar os edifícios mais eficientes do ponto de vista energético é o exemplo que deve também ser dado pelas autoridades públicas, enquanto detentoras de grande património imobiliário. A estratégia de renovação aprovada, ELPRE, orienta a forma de converter o parque edificado existente num parque de edifícios descarbonizado e com um bom desempenho energético, fomentando também o uso das fontes de energia renováveis, sendo a transformação dos edifícios existentes em edifícios com necessidades quase nulas de energia,

ou seja, em edifícios nZEB (*nearly Zero Energy Building*), um dos objetivos prioritários desta estratégia [30].

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho consistiu em analisar o desempenho energético de um edifício de serviços já existente em pleno funcionamento e exploração, com vista a propor soluções adequadas e otimizadas de melhoria do seu desempenho energético.

Assim, conjugando os interesses da direção com as possibilidades de visita e de recolha de dados no local, face às restrições do período pandémico, o edifício objeto do estudo foi o imóvel que se encontra alocado ao funcionamento da estrutura residencial para idosos da Santa Casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim (SCMPVarzim). Para esse edifício em concreto, foi estudado o impacto de diferentes medidas de melhoria ao nível do desempenho energético, bem como analisada a rentabilidade económica da intervenção.

A análise do desempenho energético do edifício e a avaliação do impacto das medidas de melhoria propostas foi efetuada com recurso ao software TRNSYS, o que permitiu discriminar os detalhes da estrutura do edifício, nomeadamente as propriedades dos materiais de construção e os sistemas construtivos utilizados, e assim representar de forma rigorosa a realidade do edifício, obtendo-se resultados coerentes e mais fidedignos.

Foram também avaliadas as alterações necessárias para que o edifício objeto de estudo, atingisse o estatuto de um edifício nZEB

Dadas as limitações orçamentais que impedem a realização de uma só vez do investimento necessário à implementação das medidas de melhoria, desenvolveu-se ainda um modelo de otimização de programação linear, com o objetivo de definir quais as prioridades.

1.3 Metodologia

A metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho passou por três fases distintas: uma inicial de pesquisa bibliográfica e da legislação em vigor, nacional e europeia; uma segunda fase de caracterização e análise do edifício objeto de estudo relativamente ao seu desempenho energético atual; e por último, a fase em que se apresentam e avaliam as medidas de melhoria de eficiência energética.

Assim, a primeira etapa consistiu num estudo bibliográfico da legislação, nacional e da união europeia, relacionada com o desempenho energético de edifícios, que permitiu definir o objetivo a alcançar e as medidas melhoria a estudar e avaliar subsequentemente. A segunda fase teve como principal foco o estudo energético do edifício da SCMPVarzim, tendo-se começado por efetuar uma caracterização do seu atual estado, definindo e avaliando os aspetos que poderiam ser melhorados recorrendo ao software TRNSYS para determinar as necessidades térmicas do edifício, para depois quantificar o impacto dessas necessidades, designadamente no sistema de climatização e na envolvente exterior (paredes opacas e vãos envidraçados), bem como na iluminação. Na última fase deste trabalho analisaram-se um conjunto de medidas de melhoria de acordo com a legislação de referência, nomeadamente a ELPRE [30], bem como a viabilidade económica das melhorias propostas, tendo sempre em vista a racionalização e a melhoria do desempenho energético do edifício.

Na caracterização do edifício identificam-se os parâmetros comportamentais críticos para o consumo de energia do edifício, definindo-se quais os aspetos que podem ser melhorados com vista à rentabilização das suas potencialidades em termos energéticos. Analisaram-se também

os elementos construtivos nomeadamente a envolvente exterior, vidros e os sistemas técnicos no que diz respeito à iluminação e climatização, sendo propostas as medidas de melhoria que resultaram da análise efetuada. Foi também objeto de estudo a avaliação da viabilidade económica das melhorias apresentadas na reabilitação energética, bem como a análise das medidas/alterações necessárias para que o edifício cumpra os requisitos nZEB, nomeadamente o estudo de integração de fontes de energias renováveis.

Uma vez que a legislação em vigor refere a importância de os edifícios terem os estatutos de nZEB, foi também definida uma solução de reabilitação energética visando os requisitos nZEB, considerando uma otimização ao nível de isolamento térmico e a instalação de painéis solares e fotovoltaicos para satisfazer as necessidades energéticas de aquecimento do edifício.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por 7 capítulos, e encontra-se estruturada da seguinte forma:

No capítulo 1 é efetuada a contextualização e a motivação para a elaboração deste estudo, referindo-se a sua relevância, os objetivos propostos e a metodologia a seguir.

Sendo a temática da eficiência energética crucial na política energética sustentável, no capítulo 2 faz-se uma análise do panorama energético no mundo, especialmente na Europa comunitária e em Portugal, sendo também efetuada uma apreciação das políticas da eficiência energéticas para o setor edificado.

No capítulo 3 analisa-se a diretiva do desempenho energético nos edifícios, EPBD, e a sua importância na definição do conceito de edifício NZEB, bem como a evolução da definição até ao atual conceito de nZEB. Analisam-se ainda os regulamentos/normas e diretivas relacionadas com o desempenho energético e os principais requisitos que devem ser cumpridos para um edifício adquirir o estatuto nZEB.

O edifício, caso de estudo neste trabalho, Pensionato, que é uma estrutura residencial para idosos da Santa Casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim, é apresentado no capítulo 4. Nesse capítulo caracteriza-se o edifício no seu estado atual, identificando-se todos os aspetos relevantes para a análise do desempenho energético, nomeadamente as propriedades geométricas e construtivas da envolvente, sistemas de climatização, iluminação entre outros. Com recurso ao software TRNSYS determinam-se as necessidades térmicas do edifício.

No capítulo 5 apresentam-se as medidas de melhoria a introduzir no edifício por forma a melhorar o seu desempenho energético, analisando-se alterações a nível da envolvente exterior, do sistema de iluminação, dos sistemas técnicos e avalia-se a introdução de sistemas com recurso a fontes de energia renovável. Neste capítulo são também avaliadas as medidas de melhoria a implementar para que o edifício cumpra os requisitos nZEB. Para cada uma dessas medidas avalia-se a sua viabilidade económica de acordo com o método simplista proposto no despacho [59].

No capítulo 6, é apresentada a viabilidade económica da proposta de melhoria de nível nZEB tendo-se recorrido a um modelo dinâmico de cash-flow. Foi também desenvolvido um modelo de otimização para definir a melhor solução de compromisso dadas as condicionantes económicas que a direção da SCMPVarzim apresentou.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 Eficiência Energética

2.1 Contextualização

A atividade humana ao longo dos últimos milénios tem vindo a provocar diversas modificações no planeta Terra, com uma constante e crescente procura de energia, principalmente nos últimos 200 anos (estima-se que a captação de energia tenha variado desde as 2 Kcal/per capita/dia no tempo do *homo-habilis* até às 230 Kcal/per capita/dia atuais no mundo ocidental, sendo que no início da revolução industrial era da ordem das 70 Kcal/pessoa/dia [70]).

A longa existência do planeta terra, a ocupação humana e a perspetiva de crescimento populacional a nível global, fez com que a utilização de recursos fósseis deixasse de ser sustentável, e a procura de novas fontes de energia alternativas passasse a ser uma prioridade. A esta prioridade acresce uma outra, a de produzir energia de uma forma limpa, aliada à necessidade de a utilizar de uma forma eficiente e racional. A necessidade de energia e dos serviços que lhe estão relacionados, tem vindo a aumentar como forma de satisfazer o desenvolvimento social e económico humano, o bem-estar e a saúde. Para além disso, hoje em dia, é comum uma nova visão sobre energia, mais focada na energia de baixo carbono e na promoção de fontes de energia mais sustentáveis.

A eficiência energética é também um fator essencial nesta visão do mundo atual, sendo muitas vezes confundida com poupança de energia, sendo, no entanto, conceitos distintos. A definição de eficiência energética, constante da Diretiva 2012/27/UE [12] isto é, “rácio entre o resultado em termos do desempenho, serviços, bens ou energia, gerados e a energia utilizada para o efeito”, está ligado ao uso racional da energia, o qual consiste em obter o melhor desempenho com o menor gasto de energia. Hoje em dia, a eficiência energética é considerada também como um recurso energético, pois é capaz de gerar significativas poupanças, sendo várias vezes designada como o “combustível oculto”. A melhoria da eficiência energética é considerada um dos pilares básicos das principais estratégias nacionais e internacionais para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, sendo para tal necessárias mudanças relevantes e adaptações ao nível social, económico e tecnológico para preservar o nosso bem-estar e o bem-estar das gerações futuras.

Daí que, um pouco por todo o mundo, os governos e as organizações não governamentais têm impulsionado planos e programas e definido estratégias no âmbito das energias renováveis e da eficiência energética, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental, no caminho para um futuro mais sustentável.

2.2 Panorama energético

Desde há mais de 500.000 anos que o *Homo erectus* já queimava madeira para cozinhar, e há 100.000 anos os *Neandertais* também o faziam. No entanto, foi só em 1698, com o surgimento da primeira máquina a vapor para fins industriais que utilizava o carvão mineral como fonte de energia, que se deu o grande salto energético, já que até aos séculos XVII/XVIII, as fontes de energia não mudaram muito. Desde então, o carvão tornou-se o combustível preferido para os motores a vapor, tendo a queima direta deste combustível sido a alavanca da Revolução Industrial, devido à sua maior capacidade de carga de energia comparativamente com as mesmas quantidades dos combustíveis à base de biomassa. A era do petróleo ocorreu em meados do século XIX e a partir daí todo um desenvolvimento tecnológico surgiu associado à exploração desses recursos energéticos. A energia barata e abundante proporcionada pelos

combustíveis fósseis tornou possível a expansão acelerada dos diversos setores de atividade económica [70].

2.2.1. No mundo

O domínio da geração de energia baseada em combustíveis fósseis como, o carvão, o petróleo e o gás é uma realidade hoje em dia, e a maior parte dos países depende dos combustíveis fósseis para responder às suas necessidades de energia. O aumento da população que ocorreu nas últimas décadas originou uma crescente necessidade de energia, pois a grande maioria das atividades humanas dependem do fornecimento e consumo de energia. A energia é assim indispensável para termos conforto, luz elétrica e para nos protegermos do frio, para a mobilidade e transporte de mercadorias, sendo ainda fundamental para a produção de riqueza industrial, comercial e social.

Na Figura 2.1 apresentam-se os consumos de energia das diferentes regiões do mundo desde 1990 a 2019, onde é notória a tendência de crescimento na Ásia, que é o continente mais populoso do mundo e onde se localizam as cidades que têm apresentado maior crescimento económico [75].

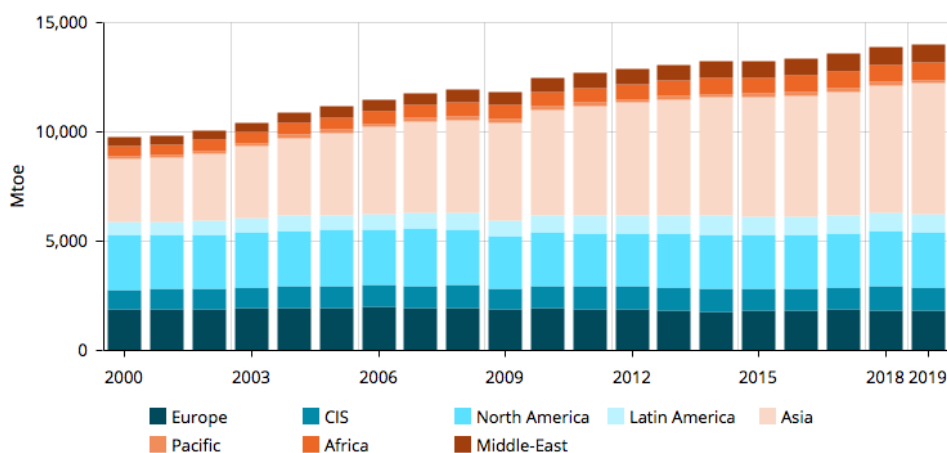


Figura 2.1- Consumo de energia no mundo, em Mtoe, [16]

A taxa de crescimento média do consumo global de energia, em 2019 foi de apenas 0,6% o que denota uma diminuição em relação aos anos anteriores, talvez por efeito das políticas ambientais que têm vindo a ser adotadas em vários países, pois no período de 2000 a 2018 a taxa de crescimento do consumo médio global rondava os 2% ao ano. Ou seja, o consumo de energia em 2019 apresentou um ritmo de crescimento mais lento do que nos anos anteriores, continuando a China a ser o maior consumidor mundial, mantendo o primeiro lugar neste indicador desde 2009 apresentando uma taxa de crescimento média anual de 3,2%. Em quase todos os países da OCDE, houve um decréscimo na taxa de consumo global de energia, que diminui cerca de 1% nos Estados Unidos, de 1,9% na UE, e de 1,6% no Japão [16].

Na última década, a tendência de crescimento do consumo de energia acentuou-se essencialmente nos países em vias de desenvolvimento, o que provocou um aumento das necessidades energéticas, de acordo com os dados da Agência Internacional de Energia (IEA).

Em relação aos consumos por vetor de energia, verifica-se que, no período de 1990 a 2018 houve um aumento de cerca de 50% no fornecimento do gás natural e de carvão, e de cerca de 70% no petróleo, como se pode observar na Figura 2.2.

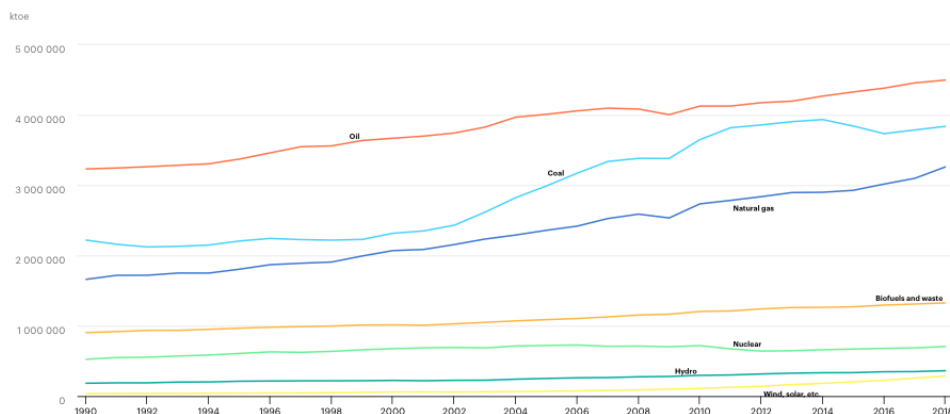


Figura 2.2 - Fornecimento de energia total no mundo, por tipos de energia, em Ktoe [17]

Apesar dos esforços de muitos países em investirem na produção de fontes renováveis de energia, os dados mostram que no que diz respeito ao uso da energia, ainda se segue a direção errada, uma vez que o consumo de energia aumentou e as emissões de CO₂ também têm vindo a crescer nos países de África, Ásia e Pacífico. A percentagem de energia proveniente de fontes renováveis é ainda baixa, pois a maior parte dos países recorre aos combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural para as suas necessidades básicas de energia [17]. Na Figura 2.3 observam-se as emissões de CO₂ nas diferentes regiões do mundo.

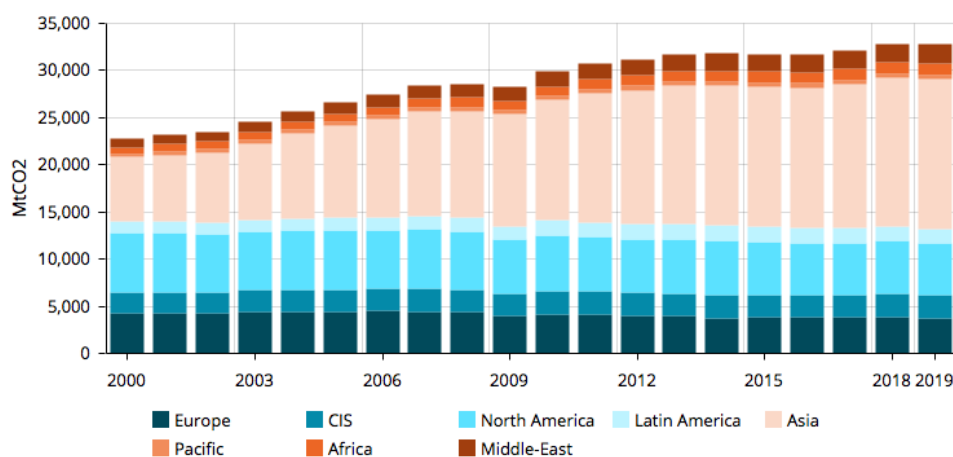


Figura 2.3 - Emissão de CO₂ no mundo, em MtCO₂ [16]

Como se verifica em 2019, a emissão de gases com efeito estufa oriundos da combustão de combustíveis diminuiu ligeiramente (cerca de 0,2%), invertendo a tendência de crescimento dos anos anteriores. Os Estados Unidos e a Europa foram os países que mais contribuíram para esta redução, tendo-se verificado uma redução de 2,4% e 3,9% respetivamente. Este facto pode ser explicado por uma menor necessidade de energia originada por um crescimento económico mais lento, e pelas campanhas de sensibilização da opinião pública para a redução de consumos de energia, bem como, os incentivos à utilização de recursos renováveis. O crescimento que tem vindo a ocorrer na economia das potências asiáticas, em particular da China, cujas necessidades de energia têm apresentado um continuo crescimento, provocou em 2017 e 2018 um aumento das emissões globais de CO₂. Os países/regiões responsáveis pelas maiores emissões são a China com 28%, os Estados Unidos com 14%, a União Europeia como um todo com 10% e a Índia com 7% [16].

Analisando o consumo de energia por diferentes setores de atividade económica (Figura 2.4), verifica-se que os três setores que mais consumiram no período de 1990 a 2018 foram a indústria, os transportes, e o setor residencial. No entanto, apesar de ser o setor da indústria o que mais energia consome, foi no setor residencial que se registou um maior aumento (34%), de acordo com os dados de 2018.

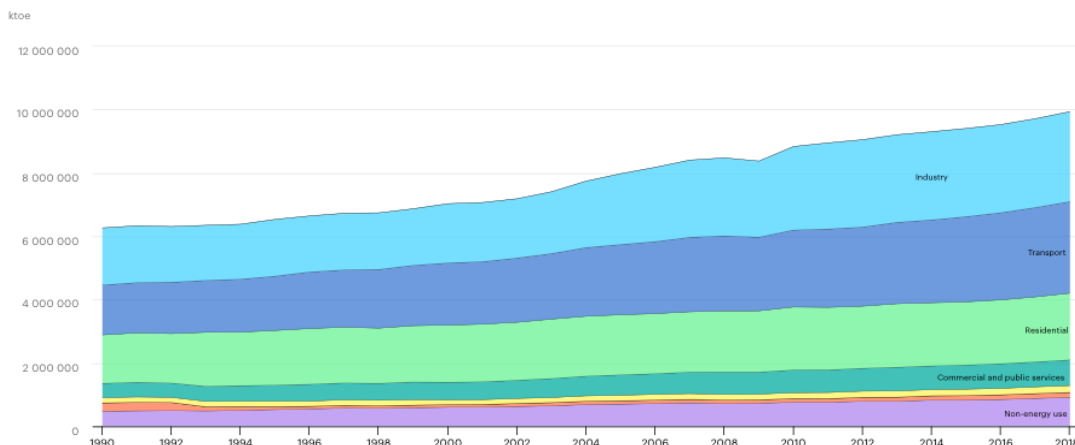


Figura 2.4 - Consumo de energia final por setor de atividade económica, em Ktoe [17]

Todas as previsões económicas apontam para um aumento do consumo da energia nos diferentes setores (descontados os efeitos da pandemia de Covid-19 nos anos 2020 a 2022) pelo que é urgente dinamizar a gestão racional da energia, e o recurso às fontes renováveis, assumindo a eficiência energética um papel crucial nesse objetivo, já que se trata, como referido, do “combustível oculto”. O indicador mundial que permite avaliar a taxa média de eficiência energética registou em 2018 um valor de 1,2%, a taxa mais baixa desde 2010, sendo o terceiro ano consecutivo em que o valor desta taxa diminuiu, conforme se pode verificar na Figura 2.5.

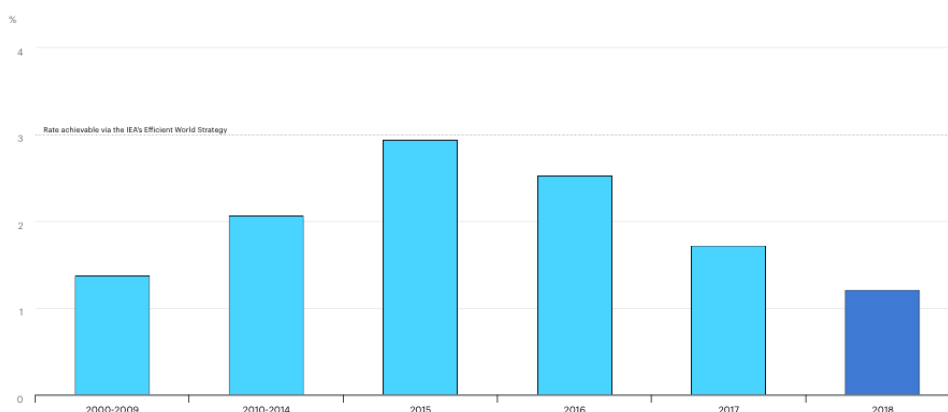


Figura 2.5 - Taxa de eficiência energética [17]

Se já antes da pandemia da Covid-19 era difícil cumprir as principais metas de energia sustentável, é muito provável que agora se tornem ainda mais difíceis de alcançar, pois os governos focam-se essencialmente no controlo da doença e em revitalizar suas economias. No início do ano de 2020 o investimento global em energia crescia cerca de 2%, sendo o maior aumento anual de gastos dos últimos anos, mas com a crise da Covid-19 houve áreas da economia mundial que estiveram paralisadas durante vários meses e como consequência o

investimento global diminuiu 20% de acordo com o relatório de investimento 2020 da IEA [17]. A crise económica global em resultado desta pandemia tem um impacto drástico no consumo de energia, que reduziu aproximadamente 10% em 2020 tendo as emissões de CO₂ baixado a nível global, cerca de 8% em 2020. Desde a crise financeira de 2009 que não se verificava um decréscimo no consumo da energia [16].

Para além do impacto na saúde a pandemia de Covid-19 também agravou e realçou a desigualdade de desenvolvimento entre os vários países. A luta para retardar a propagação do vírus é bastante difícil em alguns países que não dispõem da energia ou das condições sanitárias adequadas, tornando-se muito penoso implementar as medidas necessárias para evitar a propagação do vírus. A pandemia revelou a carência de recursos energéticos mais fiáveis e disponíveis realçando a necessidade de se superar o recurso permanente e aparentemente mais fácil aos combustíveis fósseis. Os desafios atuais que surgiram com a pandemia podem ser vistos como uma oportunidade para a utilização de energias renováveis disponíveis localmente, proporcionando o desenvolvimento industrial, mas promovendo ao mesmo tempo o bem-estar humano.

2.2.2. Na União Europeia

Com 500 milhões de habitantes correspondente a cerca de 7,3% da população mundial, e um produto interno bruto correspondente a 30% do total mundial, o conjunto dos 27 países (o Reino Unido saiu da UE em 31 de janeiro de 2020) que constituem a UE têm um peso importante no setor económico e energético a nível global. A UE tem de importar parte da energia que consome, porque possui poucas reservas e está obrigada a aceitar o preço imposto pelos mercados mundiais. Uma das grandes questões que se coloca é saber se será possível consumir menos energia, mas ao mesmo tempo manter e até aumentar a qualidade de vida e o conforto atuais. O aumento da eficiência energética é crucial para atingir esse desiderato, sendo um dos grandes objetivos da UE para 2020, tendo os dirigentes europeus decidido que é necessário que o consumo total de energia sofra uma redução e que parte do consumo de energia seja satisfeito a partir de fontes renováveis.

No gráfico da Figura 2.6 encontra-se a evolução do consumo de energia primária em função da fonte energética na UE para o período de 1990 e 2018 (dados com o Reino Unido). As principais conclusões que se retiram da sua análise é a diminuição do uso do carvão, que reduziu cerca de 50% desde 1990, e o aumento do consumo de gás natural, que aumentou cerca de 70% desde 1990. Esta evolução apesar de tudo é benéfica dado que o gás natural é menos poluente e tem maior capacidade energética do que o carvão [17].

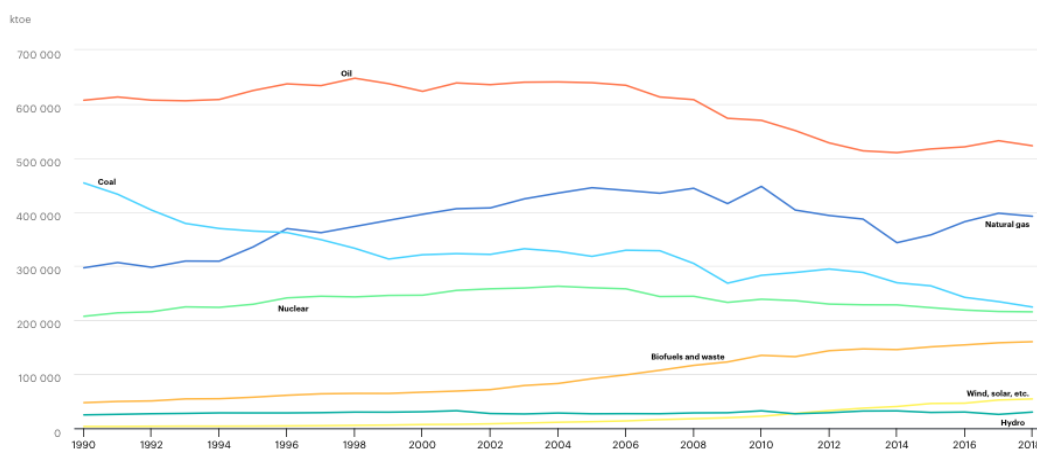


Figura 2.6 - Fornecimento de energia total na EU-28, por tipos de energia, em Ktoe [17]

Relativamente ao consumo de energia satisfeito a partir de fontes renováveis, verificou-se um grande aumento em algumas fontes como é o caso da biomassa. No entanto, tanto a energia hídrica como a eólica e a solar assumem ainda pouca expressão quando comparadas com outras fontes.

Sendo a UE constituída por países que apresentam um elevado nível de desenvolvimento, o crescimento do consumo de energia primária é baixo quando comparado com outras regiões como a Ásia na sua totalidade ou a China (no ano de 2018 a UE representava cerca de 14% do consumo global d energia, quando comparado com o PIB que como referido é de 30% do total mundial [17]. A União Europeia definiu em 2015 regras e objetivos para aumentar a eficiência energética, apoiar a exploração de fontes de energia mais ecológicas e aumentar a quota das energias renováveis, pelo menos para os 32%, até 2030 [18]. A UE tem igualmente sido pioneira no desenvolvimento de medidas para reduzir as emissões de gases causadores de efeito de estufa, tendo entre 1990 e 2018 as emissões de CO₂ diminuído cerca de 20%, conforme se pode observar no gráfico da Figura 2.7.

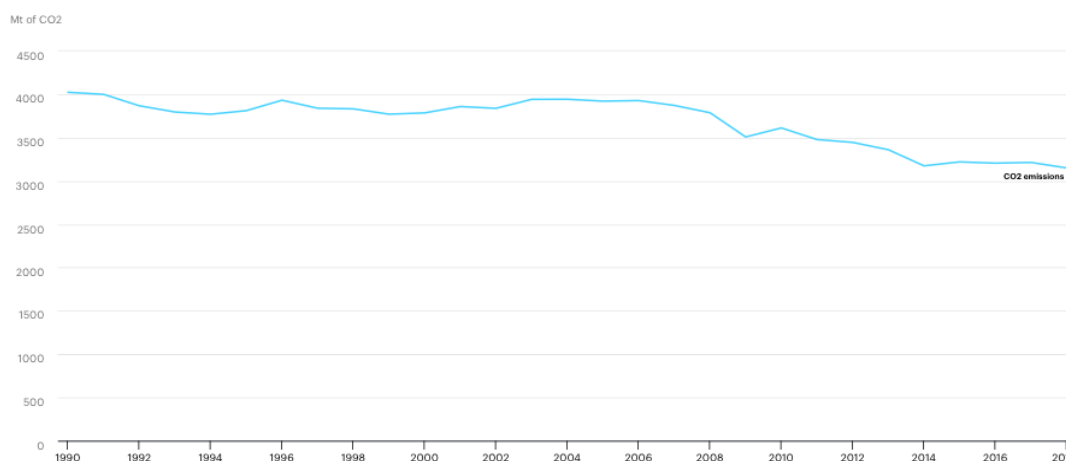


Figura 2.7 - Evolução das emissões de CO₂ na UE, em MtCO₂ [17]

O objetivo da UE é reduzir as emissões de gases com efeito de estufa entre 80% a 95% até 2050 o que tem implicações significativas no sistema energético, havendo uma necessidade premente de o tornar mais eficiente. Este compromisso político exigirá uma revisão da legislação e das metas em matéria de política energética, a fim de refletir essa ambição no domínio do clima. A eficiência energética é uma componente chave da política de energia do século XXI, e é crucial para assegurar o cumprimento dos objetivos dos acordos para as alterações climáticas, em particular os que foram estabelecidos na cimeira de Paris. Os edifícios na UE, são responsáveis por 36 % das emissões de CO₂ e por 40 % do consumo de energia, pelo que intervir na sua eficiência e reduzir os consumos de energia tem um grande impacto e contribui para o combate às alterações climáticas [35]. Incentivar os Estados-Membros a investir, em particular na reabilitação urbana, é atualmente a preocupação da UE em termos de eficiência energética [19]. O investimento na eficiência energética, associado à reabilitação urbana levou já à implementação de algumas das medidas, nomeadamente as relativas ao isolamento térmico dos edifícios, e à instalação de novos equipamentos mais eficientes energeticamente. Também foram desenvolvidas outras medidas para melhorar a eficiência energética como a imposição de requisitos de conceção ecológica nos eletrodomésticos, nomeadamente televisores, frigoríficos, máquinas de lavar louça, roupa, e outros, bem como a substituição das lâmpadas por lâmpadas de baixo consumo [19].

O Conselho da UE, em junho de 2020 nas conclusões sobre a resposta à pandemia de Covid-19 no setor da energia, destaca o papel crucial deste setor na recuperação económica e

reforça que a energia precisa de se tornar mais ecológica. A necessária transformação económica no sentido do crescimento sustentável e da neutralidade climática, com base no Pacto Ecológico Europeu, é uma grande oportunidade para estimular as economias dos Estados-Membros, e reduzir gradualmente a utilização de combustíveis fósseis, promovendo o desenvolvimento e implantação de tecnologias hipocarbónicas seguras e sustentáveis e de custos baixos. O Fundo Monetário Internacional (FMI) teme que a pandemia Covid-19 e a crise económica possam ter um efeito negativo nos investimentos que irão muito provavelmente retardar a transição energética por várias razões, designadamente por a prioridade ser a saúde pública e a recuperação económica, associada às dificuldades financeiras para prosseguir com os projetos. A IEA refere que em 2020 deve registar-se uma descida de 13% nas novas instalações de fontes renováveis de energia para produção elétrica, o que representa menos 20% do que era estimado antes dos efeitos da pandemia. A este facto junta-se a queda dos preços do petróleo e do gás o que também afeta a competitividade dos combustíveis renováveis [17].

2.2.3. Em Portugal

Portugal é um país com uma elevada dependência energética externa, uma vez que não possui recursos petrolíferos próprios, nem jazidas de gás natural ou minas de carvão em atividade. Estas formas de energia primária têm de ser importadas, fazendo com que Portugal esteja sujeito a fatores externos como a volatilidade dos preços nos mercados. Comparando com os países da UE, em 2019, Portugal foi o 4º país com a maior dependência energética apresentando uma dependência na ordem dos 74% enquanto a média da UE-28 foi de 55,1%. Refira-se ainda que desde 2017 a dependência energética de Portugal tem vindo a descer, devendo-se esta redução, segundo a DGEG, à diminuição das importações de carvão e a um aumento das exportações de biomassa [21], conforme se verifica na Figura 2.8.

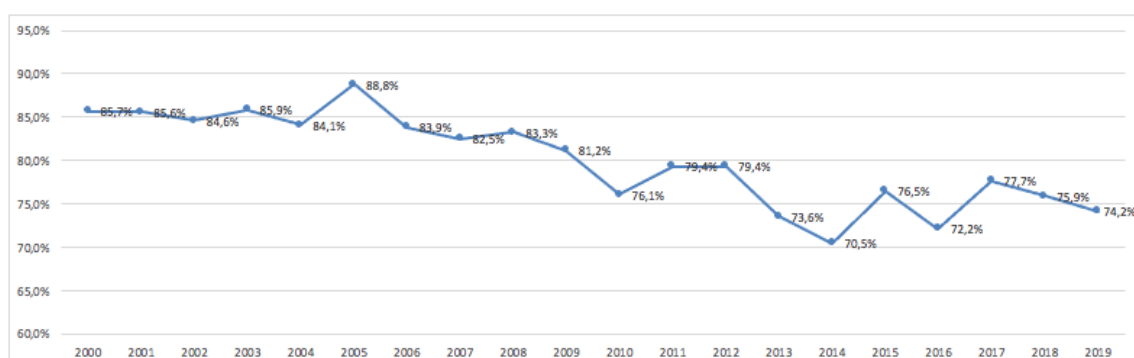


Figura 2.8 - Evolução da dependência energética de Portugal [21]

Atualmente Portugal já utiliza mais energia limpa, tendo o contributo da energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto em 2019, sido de 30,7%, de acordo com a DGEG [21]. Como a quota de energias renováveis tem vindo a aumentar, é possível baixar a dependência energética para valores abaixo dos 80%, o que não vem a acontecer desde 2010. No entanto, a variabilidade do regime hidrológico, tem uma grande influência na produção de hidroeletricidade. Repare-se que no ano de 2017 o índice de hidraulicidade foi bastante baixo o que provocou uma quebra significativa na produção de eletricidade através desta fonte, refletindo-se no aumento da taxa de dependência energética nesse ano, conforme se verifica na figura 2.8. No entanto, esta dependência tem vindo a ser corrigida e apesar do baixo índice de hidraulicidade que também ocorreu em 2019, a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis representou 54,2% e a dependência energética em 2019 desceu 1,4% em relação a 2018.

Analisando agora os consumos dos diferentes tipos de energia (Figura 2.9) de acordo com os dados da DGEG para 2019, verifica-se que o consumo de energia primária proveniente do carvão diminuiu 53,7% e que o consumo da energia proveniente do petróleo e seus derivados aumentou 7,9% relativamente a 2018.

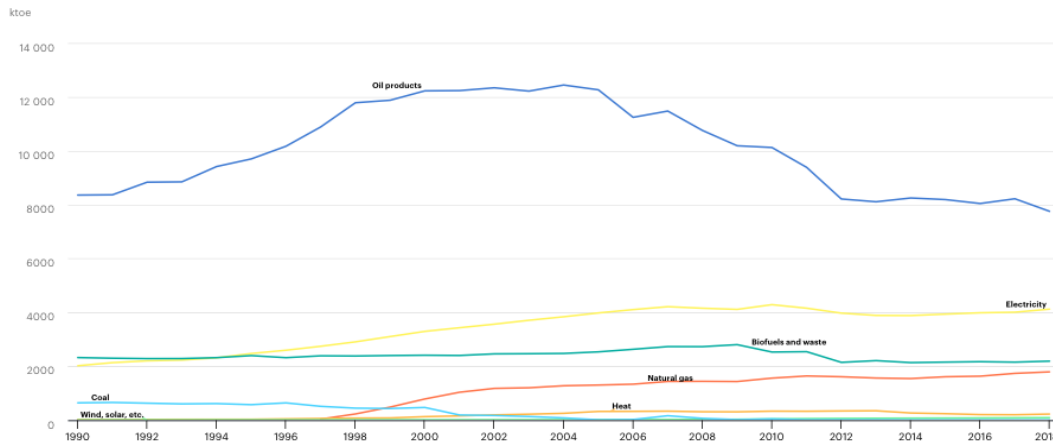


Figura 2.9 - Fornecimento de energia primária em Portugal, por tipos de energia, em Ktoe [17]

Como já referido, a percentagem de energia de fontes renováveis tem vindo a apresentar uma tendência de subida, tendo aumentado cerca de 11% em 2019, revelando uma propensão para o aumento de energia proveniente de fontes renováveis. A percentagem de energias renováveis corresponde a 29% do total da energia consumida, sendo os biocombustíveis o 3º maior fornecedor deste tipo de energia. No entanto, o aumento constante da energia de base eólica contrasta com a produção irregular de energia de base hidroelétrica, uma vez que o clima é variável, e tem havido grandes flutuações anuais nos valores da precipitação, conforme se constata na Figura 2.10 esta fonte não parece ser uma aposta segura para o futuro dada a expectável diminuição da precipitação total em Portugal, decorrente das alterações climáticas.

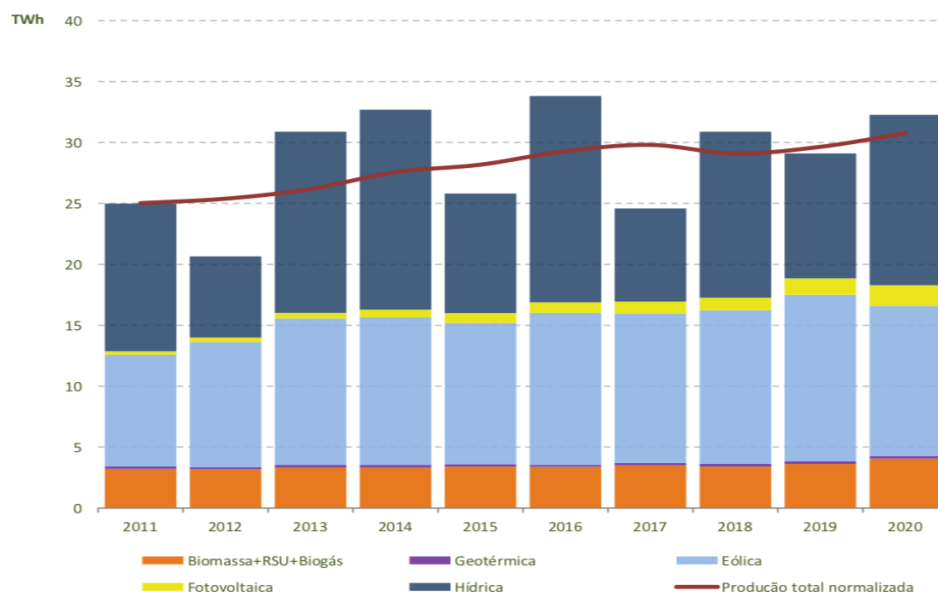


Figura 2.10 - Fornecimento de energia de fontes renováveis, por tipo de energia, em TWh [21]

De acordo com os dados da DGEG de 2018, apresentados no gráfico Figura 2.11, Portugal foi o quarto país da UE com maior incorporação de fontes de energia renováveis na produção de energia elétrica [21].

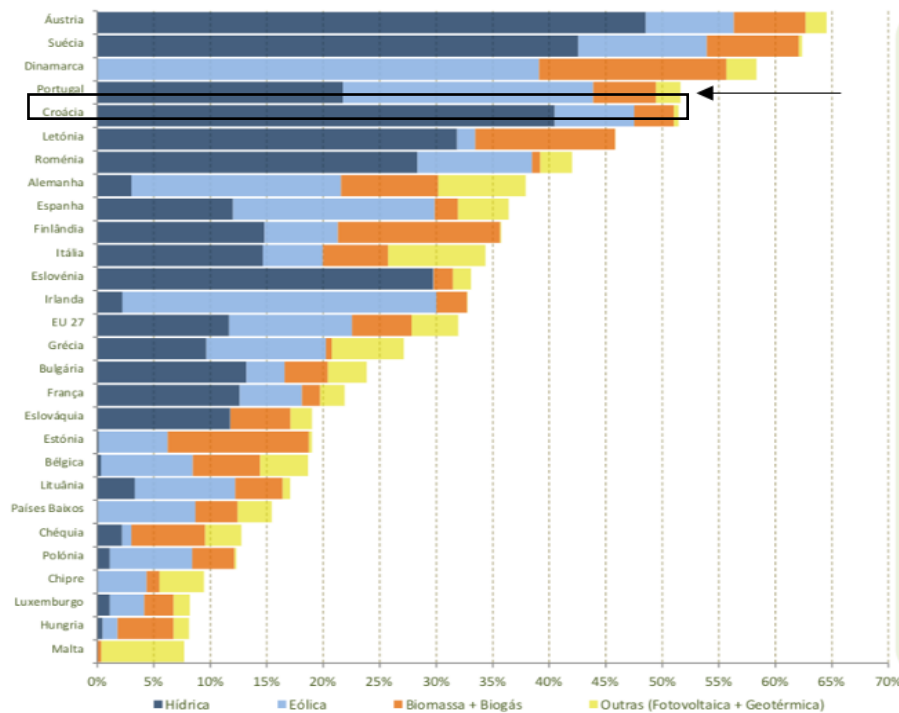


Figura 2.11 - Análise das fontes de energia renovável nos vários países da UE-27 [21]

A distribuição do consumo final de energia por setor encontra-se retratada na Figura 2.12, onde se apresentam os consumos para o período compreendido entre 2014 a 2019. De acordo com os dados disponíveis na DGEG relativos a 2019, os três sectores responsáveis pelos maiores consumos de energia foram os transportes com um consumo de 31,9%, seguido da indústria com 26,3%, e o setor dos edifícios (serviços e residencial) com 28,6%. A obrigação de permanecer em casa ditada pelos governos em relação à pandemia de Covid-19 e, em alguns casos, o próprio receio de se ser contagiado se se sair da habitação, provocou uma inversão no consumo de energia em Portugal, já que em abril de 2020 o consumo doméstico de eletricidade foi superior ao consumo industrial [76], quebrando a posição de liderança que a indústria tradicionalmente tem na procura de energia elétrica no país (espera-se no entanto que esta tendência se volte a inverter, com o regresso à situação anterior à pandemia Covid-19 já em 2022).

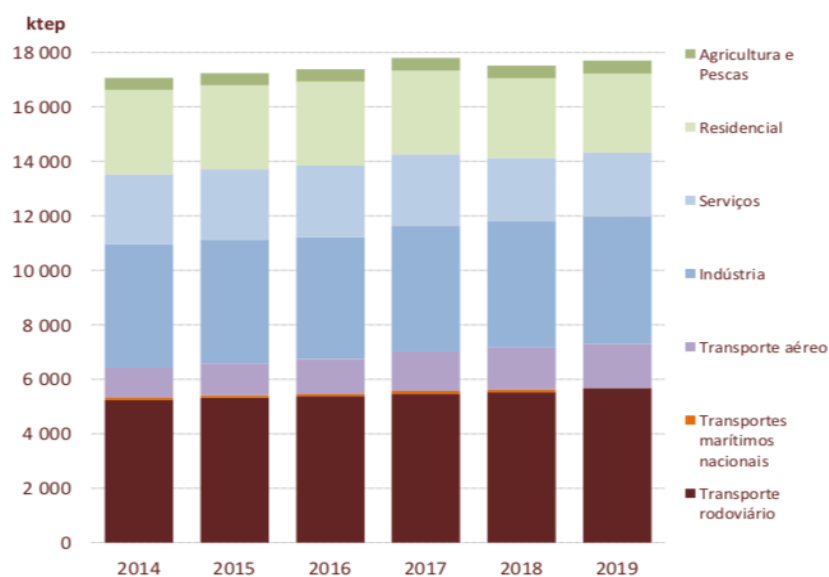


Figura 2.12 -Consumo de energia final por setor de atividade económica, em Ktoe [21]

No que diz respeito às emissões de CO₂, verifica-se que Portugal apresentou um dos valores mais baixos ao nível dos países da UE-28, com cerca de 21% abaixo do valor médio registado na UE-28, de acordo com os dados de 2017 da DGEG [17]. Importa ainda referir e de salientar o percurso que Portugal tem vindo a efetuar em termos de energia nos últimos anos, já que tem conseguido gerar riqueza, com sucessivos aumentos do PIB de 2016 a 2019, e simultaneamente produzindo menos emissões de CO₂ (Figura 2.13).

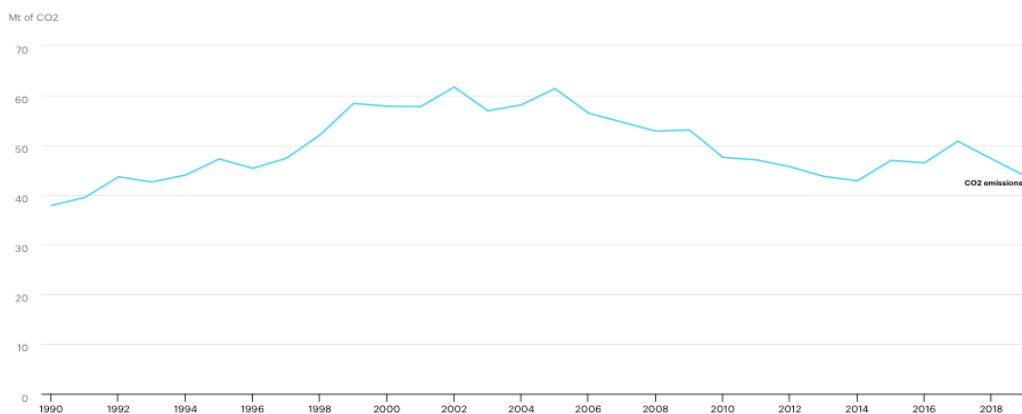


Figura 2.13 - Evolução das emissões de CO₂ em Portugal, em MtCO₂ [17]

A proteção do meio ambiente e os interesses económicos cruzam-se no caminho para a eficiência energética. Assim, de acordo com o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030), Portugal compromete-se a reduzir o consumo de energia primária dando prioridade à eficiência energética o que é crucial para a descarbonização da sociedade [22]. Ao aprovar o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050), Portugal assumiu o compromisso de atingir a neutralidade carbónica até 2050, conforme consta da resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019 [29], a qual define um caminho para a redução de emissões de CO₂, e estabelece os seguintes patamares: entre 45% e 55 % até 2030; entre 65 % e 75 % até 2040 e entre 85 % e 90 % até 2050, tendo como ano de referência 2005.

Uma das recomendações deixadas pela Comissão Europeia para Portugal conseguir recuperar da crise para a qual o país foi arrastado por causa da pandemia consiste na promoção

do investimento que faça a transição verde e digital. Na visão do atual Ministro do Ambiente e da Ação Climática, Matos Fernandes (que faz parte do XXV Governo constitucional), os temas ambientais são os que melhor podem contribuir para a recuperação da economia, a curto prazo permitindo “criar riqueza a partir de projetos de investimento que beneficiem a redução de emissões, promovam a transição energética, a mobilidade sustentável, a circularidade da economia e a adaptação e a valorização do território” [71]. Na mesma recomendação dirigida a Portugal, a Comissão Europeia refere que “existe ainda uma grande margem para melhorar a eficiência energética nos edifícios e reduzir o consumo de energia por parte das empresas” [22].

2.3 Políticas de eficiência energética para o setor edificado

A melhoria da eficiência energética e a promoção de energia de fontes renováveis são eixos prioritários das políticas energéticas europeias. Na UE os edifícios consomem aproximadamente 40% da energia primária sendo um dos setores que apresenta um maior consumo final pelo que a implementação de medidas de eficiência energética tem um impacto significativo na redução do consumo de energia e na diminuição das emissões de CO₂. Edifícios bem isolados, mais dinâmicos e interativos, onde a tecnologia é usada em conjunto com o *ecodesign* é essencial para minimizar as perdas térmicas e melhorar o desempenho energético. O uso de técnicas passivas de aquecimento e arrefecimento com uma melhor utilização da luz do dia, bem como a produção de energia renovável e o uso da tecnologia de informação para um aproveitamento mais inteligente da energia são algumas das medidas sugeridas para implementar nos edifícios com vista à melhoria da sua eficiência [25]. Nesse sentido e com o objetivo de prosseguir com os ganhos energéticos e crescimento económico, a Comissão Europeia publicou em 2020, uma nova estratégia para impulsionar a renovação denominada «Uma Onda de Renovação para a Europa - *Greening our buildings*, criação de emprego, melhoria de vidas» [50].

Portugal definiu oito objetivos para garantir o cumprimento das metas e dos objetivos definidos para o horizonte 2030, dos quais se destaca o eixo prioritário 2: “Dar Prioridade à Eficiência Energética - Reduzir o consumo de energia primária nos vários setores num contexto de sustentabilidade e custo eficaz, apostar na eficiência energética e no uso eficiente de recursos, privilegiar a reabilitação e a renovação do edificado, e promover edifícios de emissões zero” [22]. Como o setor edificado é um dos maiores consumidores de energia e sendo responsável por um terço das emissões de CO₂, considera-se que um parque edificado, remodelado e melhorado, é fundamental para atingir os compromissos definidos no âmbito da energia.

2.3.1 Regulamentação comunitária

A conjuntura regulatória internacional tem vindo ao longo dos anos a elaborar legislação cada vez mais rigorosa e impositiva, visando a eficiência energética dos edifícios, tanto no que se refere a construção nova como a edifícios já existentes, tendo em vista a redução das emissões de gases de efeito de estufa. Recentemente, os princípios que constam da recomendação da Comissão da UE relativa à modernização dos edifícios reafirmam que: “Os edifícios são fundamentais para a política de eficiência energética da União Europeia, uma vez que representam quase 40 % do consumo de energia final” [27]. Esta mesma recomendação realça ainda que aproximadamente 50 % do consumo de energia da UE é destinado ao aquecimento e/ou arrefecimento, sendo que 80 % desta quota é referente aos edifícios. Para que os compromissos no âmbito da energia e clima sejam atingidos, é necessário dar prioridade à renovação do parque edificado. Refere ainda aquela recomendação que a eficiência energética

é prioritária e que se deve “pôr em prática o princípio da eficiência energética em primeiro lugar, bem como ponderar a implantação das energias renováveis” [26], [27].

Várias iniciativas legislativas para a renovação de edifícios têm vindo a ser postas em prática, destacando-se a diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho de 2010 relativa ao desempenho energético de edifícios (EPBD [3]), que introduziu o requisito de implementação de medidas de eficiência energética em conexão com as renovações, apresentando também requisitos de desempenho energético otimizados para os novos edifícios. Esta diretiva realça que as medidas destinadas à melhoria do desempenho energético dos edifícios devem ter em consideração o comportamento térmico, a eficiência energética dos sistemas e promover a utilização de fontes de energia renováveis. O conceito de nZEB (*nearly Zero Energy Building*) surge nesta diretiva, como sendo um edifício que tem um elevado desempenho energético e em que é quase nula a quantidade de energia necessária para serem utilizados e a pouca energia que precisam deverá ser maioritariamente obtida através de fontes renováveis [3]. O Regulamento Delegado UE n.º 244/2012 completa esta diretiva estabelecendo uma metodologia comparativa para o cálculo dos níveis de desempenho energético dos edifícios e das suas componentes [24].

A diretiva de eficiência energética (DEE) da UE de 2012 [12] alterada em 2018 pela Diretiva 2018/2002 do Parlamento Europeu e do Conselho [26], define metas ambiciosas para a redução da dependência energética e a sua transição para as energias limpas. De facto, estabeleceu o objetivo de aumentar a eficiência energética dos edifícios em 32,5% até 2030, determinando a obrigação dos Estados-Membros terem de reduzir em cerca de 0,8 % o consumo anual de energia, o que incentiva a energia produzida nos edifícios através de fontes de energia renováveis, diminuindo a quantidade de energia de combustíveis fósseis a utilizar.

Por fim, a mais recente diretiva da UE relativa à eficiência energética é a Diretiva 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho [25], que altera a EPBD [3], e pretende acelerar a modernização dos edifícios, já que tal é fundamental para que a UE alcance um parque edificado com elevado desempenho energético, tendo em vista o cumprimento do objetivo de redução das emissões de gases com efeito estufa até 2050. Esta diretiva é complementada por roteiros nacionais definidos por cada um dos Estados-Membros com metas e indicadores do progresso, com financiamento e investimento público e privado. De acordo com a referida Diretiva é também necessário definir estratégias de renovação para o parque de edifícios existente em cada Estado-Membro, as quais devem ser elaboradas a nível nacional de modo a assegurar a transformação dos edifícios existentes em edifícios descarbonizados e de elevada eficiência energética. Destacam-se ainda as seguintes novidades que surgem pela primeira vez nesta diretiva: a instalação ao nível da infraestrutura de pontos de carregamento para a mobilidade elétrica, sistemas autorreguladores de temperatura, sistemas de monitorização e automatização quando viável, indicador do grau de aptidão do edifício para tecnologias inteligentes (*Smart readiness indicator*) entre outras [25].

A alteração de 2018 da EPBD [3] incide em três temas chave: a reabilitação do edificado, o financiamento das intervenções e a melhoria tecnológica dos edifícios. Assim, o objetivo nZEB, inicialmente concebido para edifícios novos, foi estendido aos edifícios existentes, através desta diretiva [25]. Converter o parque imobiliário num parque descarbonizado, de elevada eficiência energética, e proceder à transformação rentável dos edifícios existentes em edifícios com necessidades quase nulas de energia, é o objetivo da estratégia de renovação a longo prazo. A obrigação de os Estados-Membros estabelecerem uma estratégia de renovação a longo prazo para os edifícios foi deslocada da EED [12] para a EPBD [25], tendo a Comissão Europeia publicado a recomendação relativa à renovação de edifícios [28], o que permitirá alcançar a eficiência energética do parque imobiliário renovado. A renovação dos edifícios existentes é assim crucial, pois o parque edificado é o setor em que as transformações poderão originar maiores poupanças de energia, o que faz com que seja um eixo de intervenção prioritário e essencial para atingir o objetivo da UE relativamente ao clima e à energia.

2.3.2 Legislação nacional

Com a publicação da diretiva EPBD da Comissão Europeia, [3] relativa ao desempenho energético dos edifícios, surge em Portugal o Decreto-Lei n.º 118/2013 [13], de 20 de agosto, que veio substituir os anteriores diplomas legais sobre o assunto, transpondo para a legislação nacional a referida diretiva. Na referida diretiva EPBD, apareceram aspetos que obrigaram a introduzir alterações nos regulamentos técnicos então existentes e em vigor em Portugal, que passaram a incluir o conceito de custo/benefício com requisitos mínimos mais exigentes e controlados a nível europeu, através de uma metodologia comum.

Saliente-se ainda que aquele Decreto-Lei [13] surgiu com uma configuração diferente agregando num único diploma toda a legislação anterior que se encontrava dispersa nos Decretos-Lei n.º 78/2006, n.º e n.º 80/2006, que foram revistos e atualizados. Com a sua publicação foram também aprovados o SCE, o REH e o RECS, e veio ainda regulamentar as condições de aplicação dos conceitos de eficiência energética e a utilização de sistemas de energias renováveis de acordo com as requisitos e disposições contidas no REH e no RECS. O desempenho energético de edifícios passou a ser avaliado por um certificado, onde são identificadas as medidas de melhoria de desempenho energético, os sistemas de climatização, de preparação de água quente sanitária, e de iluminação, os quais ficam sujeitos a padrões mínimos de eficiência energética, passando a existir uma indicação para o aproveitamento de energias renováveis. Foram também introduzidas orientações relativas ao conforto térmico, com vista a melhorar o comportamento térmico dos edifícios, sendo definidos requisitos de qualidade térmica da envolvente para os edifícios novos e para os edifícios existentes que sofram intervenções. Esta legislação veio ainda implementar uma preocupação com a qualidade do ar interior, com particular atenção para os valores mínimos de caudal de ar novo, e as concentrações de poluentes, referindo a importância da ventilação natural [21].

Como referido anteriormente, uma das novidades deste diploma foi a obrigação dos edifícios passarem a ter a deter uma classificação energética, cujo objetivo é o de publicitar junto dos utilizadores, do mercado e das entidades reguladoras, a qualidade térmica do edifício, permitindo aos futuros ocupantes a obtenção de informações sobre os potenciais consumos de energia. O certificado energético nos edifícios existentes, transmite ainda informações sobre as medidas de melhoria de desempenho energético e da qualidade do ar interior, assim como a viabilidade económica das medidas, que o proprietário poderá implementar para reduzir as suas despesas energéticas e simultaneamente melhorar a eficiência energética do imóvel. Nos edifícios novos a certificação energética comprova a correta aplicação da regulamentação térmica e da qualidade do ar interior.

Ao longo dos últimos anos o Decreto-Lei n.º 118/2013 [13], foi sendo revisto tendo surgido várias alterações. Assim, a primeira alteração foi publicada através do Decreto-Lei n.º 68-A/2015, que veio estabelecer as disposições de eficiência energética, de produção de energia e de cogeração, transpondo para a legislação nacional a diretiva Europeia DEE [12]. O Decreto-Lei n.º 194/2015, de 14 de setembro, constituiu a segunda alteração, e veio instituir um regime excecional aplicável à reabilitação de edifícios ou de frações, cuja construção tenha sido efetuada há mais de 30 anos ou localizados em áreas de reabilitação urbana, sempre que se destinem a habitação. A terceira alteração foi efetuada através da publicação do Decreto-Lei n.º 251/2015, que clarifica alguns dos conceitos empregues no Decreto-Lei anterior (Decreto-Lei 194/2015). A quarta alteração ocorre com o Decreto-Lei n.º 28/2016 cuja redação pretendeu superar algumas questões levantadas pela Comissão Europeia que entendeu que o Decreto-Lei n.º 118/2013 não transpunha corretamente para o direito nacional todos os requisitos da diretiva EPBD [3], sendo também melhorada a definição de edifícios com necessidades quase nulas de energia, nZEB. A quinta alteração ocorre com o Decreto-Lei n.º 52/2018 que estabelece o regime de prevenção e controlo da doença dos legionários, dados os surtos que, entretanto, ocorreram em Portugal, sendo a última e sexta alteração implementada através do Decreto-lei

n.º 95/2019 que estabelece o regime aplicável à reabilitação de edifícios constituídos em propriedade horizontal/ frações autónomas.

Portugal está comprometido com a política ambiental e energética da UE, e um dos eixos de desenvolvimento da política climática é dar prioridade à eficiência energética, que permite simultaneamente o combate à pobreza energética, a diminuição de custos para os consumidores, o corte dos consumos primários de energia e a redução de emissões de CO₂. Em setembro de 2020 foi publicado o Decreto-Lei n.º 64/2020 [36] que transpõe para a legislação nacional a diretiva da UE [26], relativa à eficiência energética, e estabelece uma nova obrigação e metas do consumo de energia final que Portugal deve atingir, no período de 2021 a 2030, que obrigam a reduções energéticas anuais de, pelo menos, 0,8%. Esta diretiva apresenta uma regulamentação suplementar para as redes de aquecimento e arrefecimento urbano, no sentido de promover a sua eficiência, e pretende que os consumidores sejam uma parte ativa na transição energética e na eficiência energética, dando também maior relevo à digitalização e à inteligência das redes como instrumento da transição energética e da ação climática. Em dezembro último foi publicado o Decreto-Lei n.º 101-D/2020 [35] que estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o SCE, transpondo a diretiva da UE de 2018 [25] para a legislação nacional. Este decreto estabelece que os edifícios novos devem ser edifícios nZEB, pelo que os requisitos sobre estes edifícios passam a ser mais exigentes, para que seja possível alcançar níveis de desempenho energético elevados e níveis ótimos de rentabilidade. Refere ainda que os níveis de desempenho e rentabilidade serão objeto de revisão periódica, em intervalos de tempo não superiores a cinco anos.

Na Figura 2.14 apresenta-se um esquema que reflete as alterações legislativas portuguesas desde a publicação da diretiva da EPBD [3].

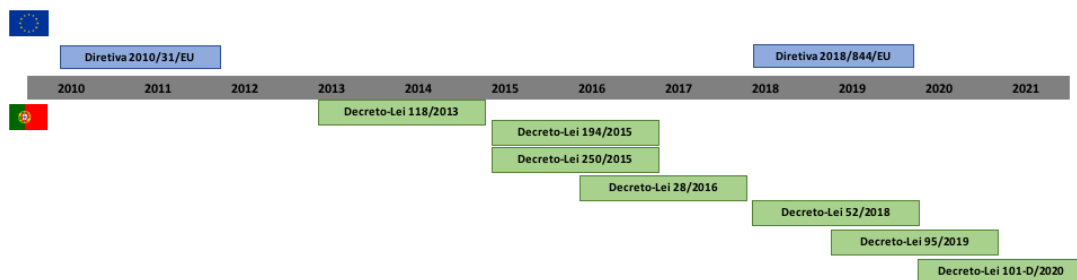


Figura 2.14 - Cronologia da legislação nacional, adaptada [49]

A diretiva 2010/31/UE [3] reforçada pela Diretiva 2018/844/UE [25], determina a obrigação de cada Estado-Membro estabelecer uma estratégia para apoiar a renovação de edifícios até 2050. Neste contexto, foi aprovada já em 2021 em Portugal a Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios (ELPRE) [30] que prevê a reabilitação de 100% do parque nacional edificado ao abrigo dos objetivos da neutralidade carbónica, promovendo a eficiência energética em edifícios. As medidas constantes na ELPRE agrupam-se em sete eixos e abrangem intervenções ao nível da envolvente dos edifícios, a substituição dos sistemas técnicos existentes por outros mais eficientes e o incentivo ao uso de energia de fontes renováveis. Realça ainda a importância de se adotarem soluções técnicas adequadas aos edifícios objeto de renovação, bem como a importância de existirem programas de financiamento ou a mobilização de investimento, público e privado para a renovação do parque edificado, prevendo também a implementação de políticas de monitorização.

A definição da estratégia a longo prazo sobre a renovação do edificado também deverá ser vista como uma oportunidade para diminuir a pobreza energética. Portugal é um dos países com maiores níveis de pobreza energética e o relançamento da economia na sequência da recessão provocada pelo quadro de pandemia causado pela doença Covid-19, prevê a criação de emprego

e oportunidades de investimento, com especial destaque para a indústria nacional da construção e reabilitação de edifícios.

3 Edifícios nZEB

3.1 Introdução

Como já foi referido anteriormente, o setor dos edifícios é responsável pelo consumo de 40% da energia na UE, mas uma boa parte desse consumo (estima-se em 24%, de acordo com [77]) pode ser reduzido através de medidas de eficiência energética, o que representa uma redução significativa na emissão de CO₂. Os edifícios são um elemento fundamental das políticas energéticas europeias devido ao elevado consumo de energia e ao potencial de poupança energética associada a este setor, assumindo um papel fundamental, para que a UE consiga alcançar as metas energéticas e ambientais. Ao mesmo tempo, edifícios melhores e mais eficientes em termos energéticos melhoram a qualidade de vida dos cidadãos e trazem benefícios adicionais para a economia e para a sociedade [26], [27].

Nesse sentido a UE tem difundido diferentes diretivas, recomendações e regulamentos associados à eficiência energética no setor da construção, como foi referido no capítulo anterior. Assim, em 2002 surgiu a primeira diretiva EPBD [20] que obrigou todos os Estados-Membros a implementarem medidas no sentido de tornar os seus edifícios novos e existentes mais eficientes do ponto de vista do consumo de energia. Entretanto as necessidades e exigências foram evoluindo, tendo ocorrido em 2010 uma alteração legal com o surgimento da EPBD Reformulada, que apresenta novas exigências e requisitos relativamente ao desempenho energético dos edifícios. Assim a diretiva EPBD (reformulada), tem como objetivo principal a diminuição da dependência energética dos edifícios de energia fóssil, assentando em dois pilares essenciais: a redução do consumo de energia com a implementação de medidas de eficiência energética; e a contribuição da energia proveniente de fontes renováveis, e, por conseguinte, a redução das emissões dos gases com efeito de estufa [3], [25] – foi introduzido também o conceito de *edifícios de balanço nulo (NZEB)*, como sendo aqueles em que a energia total fornecida ao edifício a partir da rede energética é compensada pela produção de energia pelo edifício.

Após a tentativa de implementação deste conceito de *edifícios de balanço nulo*, chegou-se à conclusão de que estes tipos de edifícios não são financeiramente viáveis, pois muitos locais não reúnem climaticamente ou geograficamente as condições necessárias e suficientes para a construção de um edifício capaz de produzir a mesma quantidade de energia que lhe é fornecida. Surgiu assim um novo conceito, ou seja, os edifícios com necessidades quase nulas de energia, ou seja, os nZEB (*nearly Zero Energy Building*), utilizando-se daqui para a frente esta sigla para referenciar este tipo de edifícios. A Diretiva EPBD [3] relativa ao desempenho energético de edifícios apresentou a definição do conceito de nZEB, sendo obrigatória a sua implementação para novas construções a partir de 2020, ou de 2018 no caso de edifícios promovidos por entidades públicas. Esta diretiva evidencia a importância dos nZEB, sejam eles novas construções ou grandes reabilitações nos edifícios existentes. No entanto, as renovações profundas de edifícios são uma pequena percentagem do parque edificado, pelo que, para que a estratégia tenha impacto, é necessário proceder à renovação de grande parte dos edifícios existentes.

Mas a Comissão Europeia quis ir ainda mais longe, e como parte do pacote legislativo “Energia Limpa para todos os Europeus” aprovou em 2018 a nova EPBD revista [25] que deverá ser transposta para a legislação interna de cada Estado-Membro no prazo de 20 meses. A EPBD revista tem dois objetivos complementares: um primeiro, que consiste em acelerar a renovação dos edifícios existentes até 2050; e um segundo que inclui o apoio à modernização de todos os edifícios com tecnologias inteligentes e o estabelecimento de uma ligação mais clara com a mobilidade limpa. Nesse sentido, já durante 2021, e de acordo com essa diretiva da UE, que determina a obrigação de cada Estado-Membro estabelecer uma estratégia de longo

prazo para apoiar a renovação dos edifícios até 2050, de modo o que a área total edificada se converta num conjunto imobiliário descarbonizado e de elevada eficiência energética, o Conselho de Ministros, através da Resolução 8A/2021 [30], transpôs a diretiva e aprovou a estratégia de longo prazo para a renovação dos edifícios, a qual prevê a reabilitação de 100% do parque nacional edificado com vista à melhoria do seu desempenho energético, e a progressiva descarbonização, contribuindo assim para a mitigação da pobreza energética.

Estas medidas originarão edifícios mais eficientes do ponto de vista energético o que acarreta significativas vantagens em termos de conforto térmico e economia para os seus utilizadores e, consequentemente a redução da emissão de gases com efeito de estufa para a atmosfera, surgindo, deste modo, a importância de valorar o conceito de nZEB. A ELPRE pretende ir ao encontro dos objetivos europeus e nacionais de alcançar a neutralidade carbónica, e de promoção da eficiência energética dos edifícios existentes, com vista à sua transformação em edifícios nZEB.

3.2 Conceito de NZEB (*Net Zero Energy Building*)

A definição de NZEB, ou seja, edifício com necessidades nulas de energia, ou edifício com balanço de energia nulo, é complexa na medida em que não existe uma ligação entre os vários conceitos. NZEB é um edifício usualmente designado como um edifício com um desempenho energético elevado, capaz de gerar energia a partir de fontes renováveis, de modo a compensar a sua procura de energia [14]. Realça-se o facto de que um edifício NZEB é um edifício em que o balanço anual de energia é zero, sendo capaz de restituir à rede a quantidade de energia que lhe foi fornecida pelas redes elétricas e pelas redes de gás públicas. Ou seja, não são edifícios autossustentáveis na medida em que requerem energia da rede para as suas necessidades de aquecimento, refrigeração, ventilação, etc., mas têm sistemas locais que produzem e exportam essa mesma energia para as redes públicas, de modo que o balanço anual de energia seja zero.

Apresenta-se na Figura 3.1 um esquema representativo do conceito de edifícios de balanço energético nulo.

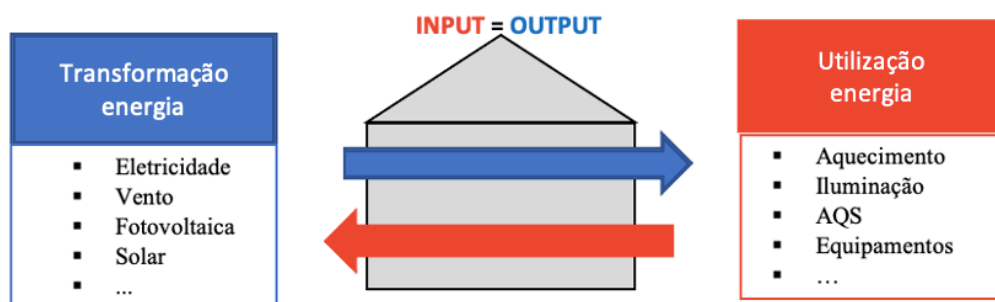


Figura 3.1 - Representação esquemática do balanço energético nulo, adaptado [31]

De acordo com a Figura 3.1, os edifícios trocam energia com a rede de distribuição na forma de combustíveis (eletricidade e/ou calor/frio e/ou combustíveis), que são convertidos em energia primária utilizando para o efeito fatores de conversão. O balanço energético (BE) é dado pela diferença entre a energia produzida pelo edifício (E_p) e a energia fornecida ao edifício (E_u),

$$BE = \sum_i E_{p,i} \times F_{p,i} - \sum_i E_{u,i} \times F_{u,i} , \quad (3.1)$$

em que os fatores de conversão F , de cada vetor energético i , são utilizados para converter as unidades físicas em outras métricas, como a energia primária ou a emissão de carbono equivalente.

Analisando a equação (3.1), e no que diz respeito a novos edifícios ou a edifícios sujeitos a grandes intervenções de reabilitação, três cenários são possíveis, dependendo do sinal do valor do balanço energético BE . Assim, no caso de $BE = 0$ tal corresponde a um balanço de energia anual nulo, sendo a produção de energia efetuada no edifício, igual à energia consumida pelo mesmo, pelo que se está perante um edifício com balanço nulo, ou seja, um edifício NZEB. Se $BE \approx 0$ o balanço energético do edifício fica ligeiramente abaixo do equilíbrio neutro sendo neste caso identificado como um edifício de balanço quase nulo, ou seja, um nZEB. Caso $BE \geq 0$ representa um cenário em que o balanço é positivo, ou seja, o edifício produz mais energia do que a que utiliza, pelo que o edifício é classificado como de balanço positivo, ou seja, é um edifício com energia excedentária ou *plus energy*.

A forma de alcançar o requisito de NZEB é obtida pelo balanço entre o aumento da eficiência energética, o que equivale a diminuir as necessidades de energia, e o aumento da oferta de energia pelo próprio edifício, proveniente de fontes renováveis. Na Figura 3.2 apresenta-se um esquema que relaciona as duas principais ações necessárias para alcançar o requisito de NZEB, o qual é representado pela linha de “balanço energético nulo”. Assim, qualquer edifício representado por um ponto nessa linha, ou no quadrante acima dela, é considerado um NZEB.

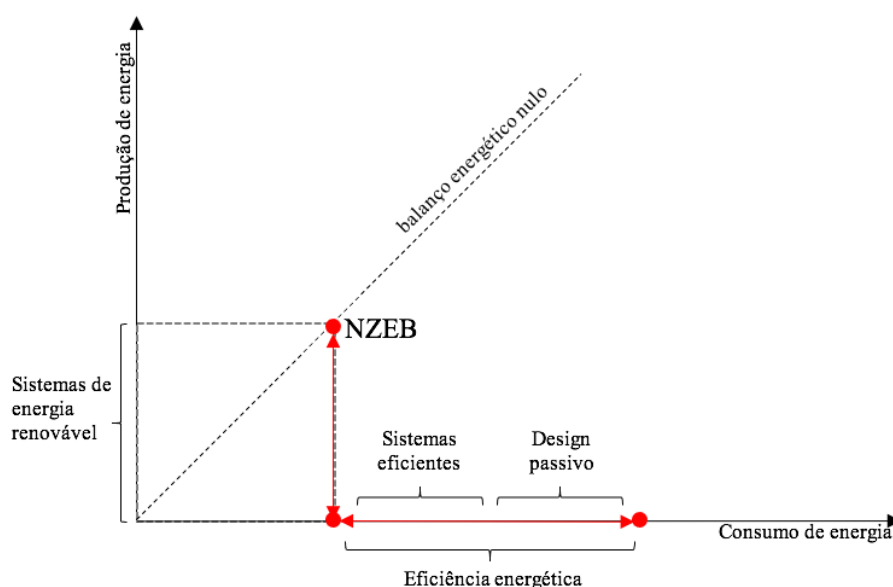


Figura 3.2 - Representação das ações para atingir um balanço energético nulo, adaptado [14, 31]

3.3 Conceito de nZEB (*nearly Zero Energy Building*)

Conforme anteriormente referido, a implementação do conceito de NZEB apresenta várias dificuldades pois muitos locais não apresentam os requisitos climáticos ou geográficos necessários para a construção de edifícios capazes de produzir a quantidade de energia que necessitam, pelo que este tipo de construção, à partida, não é economicamente viável. Por tal motivo, surgiu o conceito dos edifícios com necessidades quase nulas de energia, usando-se a sigla nZEB para os designar. De acordo com a diretiva da UE 2010/31/ [3], o nZEB passou a ser um requisito para novas construções a partir de 2020 (ou de 2018 para edifícios públicos),

sendo o conceito de nZEB apresentado nessa diretiva, como sendo um edifício que "tem um desempenho energético muito alto com quase zero ou muito pouca quantidade de energia necessária, e em que uma parte significativa é obtida através de fontes renováveis". Ora esta definição é bastante ambígua pois o “quase zero” é algo difícil de definir, ou seja, o consumo deve ser “pouco” maior do que a produção de energia, sendo que o “quase” e o “pouco” são vocábulos vagos e indeterminados. A primeira parte desta definição estabelece o desempenho energético como o elemento que torna um edifício num nZEB. A segunda parte da definição fornece princípios orientadores para se alcançar um desempenho energético muito alto, obrigando a que uma parte muito significativa da energia necessária para o consumo do edifício, seja obtida por fontes renováveis.

Em termos europeus, um nZEB pode apresentar um consumo de energia primária não renovável superior a 0 kWh/m²ano, desde que não ultrapasse o valor limite imposto a nível nacional.

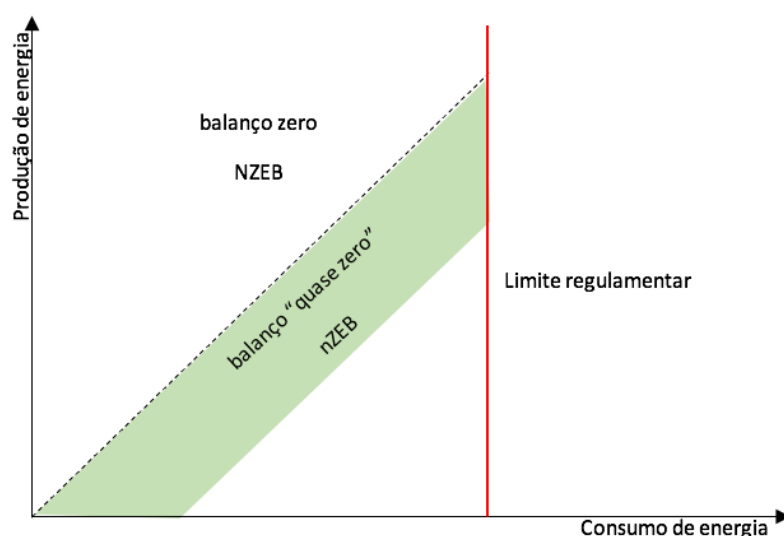


Figura 3.3 - Representação de balanço energético quase nulo, adaptado [31]

O primeiro passo para atingir a meta do balanço energético nulo é diminuir as necessidades energética do edifício, através da implementação de medidas de eficiência energética nomeadamente de construção solar passiva e de utilização de sistemas energeticamente eficientes; o segundo passo será a utilização de fontes de energia renováveis.

Também já se referiu que para reduzir as necessidades energéticas dos edifícios é necessário combinar estratégias de eficiência energética nomeadamente sistemas passivos, iluminação e ventilação natural, otimização térmica da envolvente e sistemas eficientes, com a utilização de fontes de energia renováveis. As principais fontes de energia renovável são a energia solar, a energia eólica, a energia hídrica, a energia geotérmica, a proveniente das ondas das marés e da utilização de biomassa. No entanto, nem todos estas fontes são semelhantes já que o impacto ambiental resultante da produção de energia varia com as origens, pelo que deve ser dada prioridade às tecnologias que minimizem esse impacto, e que estejam disponíveis durante a vida útil do edifício [42].

3.4 Evolução do conceito nZEB na União Europeia

As metas de implementação dos nZEB a partir de 2020 representa uma das maiores oportunidades para aumentar a poupança energética e minimizar as emissões de gases com

efeito de estufa. A UE publicou as diretrizes para promover políticas que ajudarão a alcançar um parque edificado descarbonizado e eficiente em termos de energia, nomeadamente a Diretiva do Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) [20], posteriormente reformulada e revista em 2018 [25], e a Diretiva Eficiência Energética (DEE) [12], [26].

Tal como já foi referido na secção anterior, a definição de edifício nZEB é apresentado na diretiva EPBD da UE de uma forma flexível e sem harmonização, permitindo que cada um dos Estados-Membros concretize a definição que melhor se adequa. O artigo 9º desta diretiva, exige aos Estados-Membros que garantam que todos os edifícios novos construídos a partir de 2020 (2018 para edifícios públicos) passem a ter o estatuto de nZEB, ou seja, a terem níveis elevados de desempenho energético, e a explorarem de forma mais efetiva as fontes de origem renovável. Esta mesma diretiva estabelece que os Estados Membros devem desenvolver políticas e tomar as medidas necessárias para estimular a transformação dos edifícios existentes em nZEB, devendo a Comissão Europeia ser informada dos planos nacionais de cada um dos Estados Membros sobre a implementação destas políticas.

Na Figura 3.4 apresenta-se um esquema que retrata a evolução temporal associada à implementação das diretivas da EPBD Reformulada de 2010 [3].

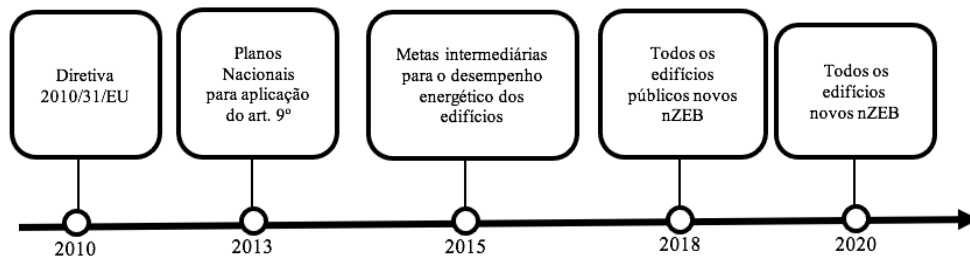


Figura 3.4 - Cronograma para implementação da diretiva EPBD, adaptado [32]

A aplicação da diretiva EPBD tem sido objeto de variada análise desde que foi publicada, tendo, no final do ano de 2017, sido apresentado um relatório com as últimas atualizações sobre a adoção desta diretiva em cada um dos países membros da União Europeia [33]. De acordo o referido relatório (National applications of the NZEB definitions (2018), [33]), 77% dos Estados Membros ou seja 21, já tinham transposto para o seu direito interno a definição nZEB, sendo que o Luxemburgo apenas tinha publicado essa definição para os edifícios residenciais. De acordo com o mesmo relatório, houve uma evolução bastante positiva nos últimos anos, já que em 2015 apenas 16 dos Estados-Membros tinham transposto as normas e concretizado as definições (Progress report on NZEBs (2014), [72]). Note-se que, pelo facto de a UE não harmonizar as definições dos vários Estados-Membros e a diretiva utilizar termos vagos e imprecisos para a definição do que é um edifício nZEB, que carecem de ser interpretados, torna mais difícil a comparação entre as diferentes definições e soluções adotadas nas legislações nacionais.

Verifica-se assim que alguns dos Estados-Membros incluem na definição um indicador de utilização de energia primária, expresso em (kWh/m²ano) e têm em consideração as utilizações de energia do edifício exigidas pela diretiva EPBD, para aquecimento, arrefecimento, produção de águas quentes sanitárias e ventilação. Relativamente aos requisitos de utilização de energia proveniente de fontes renováveis, alguns Estados-Membros estabelecem requisitos quantitativos, obrigando por exemplo a que pelo menos 25% da utilização de energia primária seja de origem renovável, enquanto outros apenas apresentam requisitos qualitativos [41].

Obviamente que a natureza qualitativa dos critérios na definição nZEB, como já referido anteriormente, permite diferentes interpretações. Os principais pilares do nZEB, designadamente a redução drástica das necessidades de energia primária, e a garantia de que

uma parte importante do fornecimento de energia provem de energia renovável, são critérios definidos com termos ambíguos, também em algumas legislações nacionais, com expressões do tipo "quase zero" ou quantidade "muito baixa de energia", ou ainda "extensão muito significativa", o que requer uma definição mais concreta e mensurável [41].

Apresentam-se na Tabela 3.1, os três fundamentos básicos da definição de edifícios nZEB e os princípios e abordagens sugeridas para a sua implementação [41].

Tabela 3.1- Princípios da definição de nZEB, adaptado de [41]

Princípios	Proposta <i>Buildings Performance Institute Europe</i> (BPIE)
Redução do consumo energético	Definição de um limite máximo para a necessidade de energia primária
Uso de energia proveniente de fontes renováveis	Definição de um limite mínimo para a percentagem de energia proveniente de fontes renováveis.
Redução da emissão de CO ₂	Definição de um limite máximo para as emissões de CO ₂

Além de terem de legislar sobre a definição em concreto do que deve entender-se como edifício nZEB, os Estados Membros tiveram de elaborar planos nacionais e adotar medidas, políticas e incentivos financeiros para a sua promoção. Atingir a meta delineada para os nZEB em edifícios novos parece ser relativamente viável [34], mas o desafio permanece no que diz respeito aos edifícios existentes. Em média, menos de 1% do parque edificado é renovado por ano, pelo que, para cumprir objetivos ambientais e energéticos, as taxas de renovação deveriam aumentar significativamente. A percentagem média anual de renovações profundas na UE é de apenas cerca de 0,2%, com uma variação pequena quando se analisa cada um dos Estados Membros. Nesta situação em concreto Portugal apresenta uma taxa de renovação profunda do parque edificado de 0,1% [34].

Para cumprir os princípios nZEB, a legislação nacional de cada um dos Estados-Membros deve tornar mais exigentes os requisitos, sendo também necessário apoiar a implementação no mercado de tecnologias de eficiência energética e energias renováveis relacionadas com a construção e renovação de edifícios. Uma abordagem integrada entre as políticas de habitação e de uso dos edifícios e as políticas ambientais e de transição energética, através de estruturas locais, pode facilitar uma implementação mais rápida e barata de edifícios nZEBs, compensando, ao mesmo tempo, as restrições espaciais decorrentes da obrigação de implementar um sistema de fonte renovável para cada edifício [41].

3.4.1 Situação em Portugal

Ao longo dos últimos anos foram publicados um conjunto de normas, orientações, diretivas, recomendações e outros documentos regulamentares, que estabelecem os requisitos a considerar em Portugal para implementação de edifícios nZEB. A Figura 3.5 esquematiza a evolução legislativa europeia sobre esta matéria nos últimos anos.

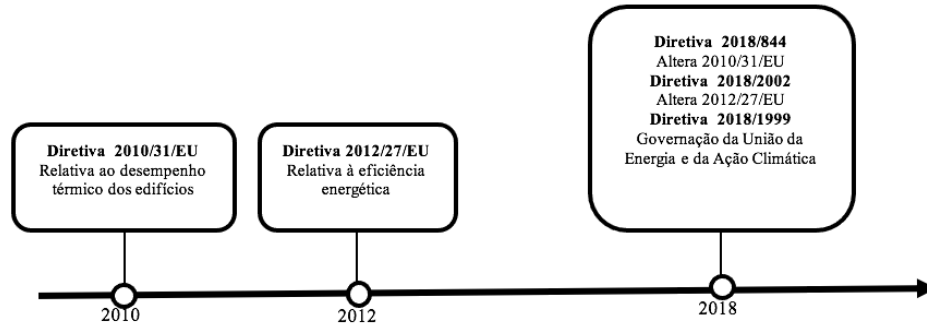


Figura 3.5 - Cronograma de evolução da legislação europeia relativa aos nZEB

Em Portugal, a definição de edifícios nZEB consta no Decreto-lei 118/2013 [13], que no artigo 16, refere o seguinte:

“Devem ter necessidades quase nulas de energia os edifícios novos licenciados após 31 de dezembro de 2020, ou após 31 de dezembro de 2018, no caso de edifícios novos na propriedade de uma entidade pública e ocupados por uma entidade pública.”

Ora este Decreto-Lei agrega no mesmo diploma, para além do Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE), os Regulamentos de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e de Comércio e Serviços (RECS), estabelecendo a base jurídica que deu respostas às diretrizes e orientações da UE, com vista a alcançar um parque edificado com necessidades quase nulas de energia. Na sequência da evolução legislativa posterior, o Decreto-Lei n.º 94/2015 [37] veio retificar a definição de edifícios com necessidades quase nulas, constante do artigo 16, sendo que, mais recentemente, foram publicadas mais duas portarias que vieram clarificar e quantificar o conceito nZEB: a Portaria n.º 42/2019 [38], e a Portaria n.º 98/2019 [39]. A primeira estabelece os requisitos nZEB em edifícios de comércio e serviços (RECS) e a segunda em edifícios de habitação (REH). Ambas identificam limites numéricos e requisitos quantitativos para definir o desempenho de edifícios nZEB, sendo que, correspondem às classes A ou A+ definidas no atual sistema de certificação energética nacional.

Em relação aos edifícios de comércio e serviços, mais relevantes para este trabalho dado que o caso de estudo diz respeito a um edifício adaptado a um lar da 3ª idade, o Pensionato da SCMPVarzim, e tal como referido, a Portaria 42/2019 [38] exige que tenham uma classe energética A ou A+ para serem considerados edifícios de necessidades quase nulas de energia, sendo esta classificação obrigatória para os edifícios públicos a partir da data de publicação da portaria, e a partir de 2021 para os restantes [13]. A classe energética, no caso de edifícios de comércio e de serviços, é determinada pelo rácio de indicadores de eficiência energética, calculados com base no somatório dos diferentes consumos anuais de energia, agrupados em indicadores parciais, e expressos em energia primária por unidade de área interior útil de pavimento ($\text{kWh}_{EP}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$), sendo definido por (3.2),

$$R_{IEE} = \frac{IEE_S - IEE_{Ren}}{IEE_{ref,S}} \quad (3.2)$$

em que,

IEE_S - Representa os consumos de energia que são considerados para efeitos de cálculo da classificação energética do edifício (inclui sistemas de climatização, aquecimento de águas sanitárias, iluminação interior e exterior, elevadores, escadas e tapetes rolantes);

IEE_{Ren} - Determinado com base na produção de energia elétrica e térmica a partir de fontes de energia renováveis, devendo apenas ser considerada a energia utilizada para consumo;

$IEE_{ref,S}$ - Indicador de referência associada aos consumos anuais de energia do tipo S, anteriormente identificados.

Também de acordo com esta portaria [38] em análise, os valores máximos do indicador de eficiência energética IEE_S e do rácio da classe energética R_{IEE} , são os constantes na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores máximos de IEE_S e R_{IEE} em função do contexto do edifício

Contexto	Exigência	
Edifícios nZEB	$IEE_S \leq 75\% IEE_{ref,S}$	$R_{IEE} \leq 0,50$
Edifícios novos	$IEE_S \leq 100\% IEE_{ref,S}$	$R_{IEE} \leq 1,00$
Edifícios sujeitos a grande intervenção	--	$R_{IEE} \leq 1,50$

Assim, e de acordo com a legislação nacional, um nZEB é um edifício que apresenta um R_{IEE} máximo de 0,50 e um IEE_S não superior a 75 % do valor do $IEE_{ref,S}$, não sendo definido em termos do consumo total de energia primária, o qual é obtido através do Indicador de Eficiência Energética (IEE), definido do modo seguinte,

$$IEE = IEE_S + IEE_T - IEE_{Ren} \text{ [kWh}_{EP}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}] \quad (3.3)$$

em que,

IEE_T - Representa os consumos de energia não incluídos no tipo S, ou seja, a ventilação e bombagem não associada ao controlo de carga térmica; os equipamentos de frio; a iluminação dedicada e de utilização pontual.

Esta definição diverge do conceito original de nZEB constante da Diretiva EPBD [3], a qual considera todos os consumos de energia presentes no edifício, facilitando a classificação do edifício nesta categoria. De facto, admitindo que a energia proveniente de fontes renováveis apenas gera a energia suficiente para as necessidades de consumo do tipo S, o edifício cumpre desde logo os requisitos para obter uma classificação A^+ , pois $R_{IEE} = 0$. No entanto, os consumos do tipo T continuam a existir e, portanto, o balanço de energia não é nulo. Por outro lado, refira-se que o importante, não é só equilibrar o balanço energético, ou seja, garantir que o consumo é aproximadamente igual à produção de energia, mas sim minimizar o consumo energético. Este será o conceito de uma *Passive House* em que a pequena parte de energia necessária é suprimida pela produção de energia de fontes renováveis do edifício.

4 Caso de estudo

Neste capítulo apresenta-se uma descrição do edifício a estudar, dando-se especial relevo aos aspetos que intervêm na análise do desempenho energético, nomeadamente o tipo de elementos construtivos usados na envolvente, para além do sistema de climatização e de iluminação.

O edifício que é objeto de estudo é a estrutura residencial para e idosos, designada por Pensionato da Santa Casa da Misericórdia na Póvoa do Varzim (SCMPVarzim). O principal objetivo deste trabalho passa por fazer uma análise ao estado atual do edifício, sob o ponto de vista de desempenho energético, e propor melhorias em função dos novos regulamentos energéticos, e de acordo com ELPRE [30]. De acordo com esta resolução, as renovações de edifícios existentes devem ter como princípio orientador a transformação dos edifícios existentes em edifícios com características próximas do nZEB. No caso do edifício do Pensionato pertencente à SCMPVarzim, vão ser analisadas melhorias do tipo passivas ao nível da envolvente, a substituição da iluminação por lâmpadas LED e medidas de melhoria relativas aos sistemas de climatização e produção de energia. Adicionalmente também se procederá à análise da instalação de painéis solares e fotovoltaicos, e a avaliação do impacto económico das diferentes medidas de melhoria propostas.

Refira-se ainda a utilidade prática do estudo pois o Pensionato, enquanto estrutura residencial para pessoas idosas, deve obedecer à legislação existente para edifícios de comércio e serviços, pelo que a sua requalificação energética é fundamental para a certificação, com vista à obtenção de acordos de cooperação com a Segurança Social.

No desenvolvimento deste trabalho houve algumas condicionantes essencialmente relacionadas com a situação epidemiológica atual, dado que, tratando-se de uma estrutura residencial para pessoas idosas, grupo de risco face à doença COVID-19, as visitas ao edifício terem sido muito condicionadas. Outro dos problemas encontrados foi o facto do edifício fazer parte de um complexo maior, e não existir o consumo discriminado de gás, água e eletricidade só para o edifício em análise.

4.1 Descrição do edifício

O edifício em estudo, como já referido, é uma estrutura residencial, designado por Pensionato pertencente à Santa Casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim. Este edifício integra o conjunto de edifícios da Santa Casa da Misericórdia localizado no concelho e no centro da cidade da Póvoa de Varzim, no distrito do Porto.

A SCMPVarzim é uma instituição de utilidade pública cujo objeto é o apoio aos cidadãos de idade avançada. O complexo de edifícios, de que faz parte o Pensionato objeto deste estudo, conta com nove edifícios, destinados aos vários serviços prestados pela instituição, destacando-se os dois edifícios residenciais identificados na Figura 4.1 pelos números (1) e (2), sendo o Pensionato o edifício identificado pelo (1), e ainda outros dois edifícios que se apresentam com valor patrimonial histórico, como é o caso do hospital datado de inícios do século XIX, designadamente de 1811 (número 9) e o edifício da igreja construído no ano de 1736 (número 8). Na Figura 4.1 apresenta-se uma fotografia aérea obtida por satélite (fonte *Google maps*), que permite visualizar todos os edifícios que integram o complexo de edifícios da Santa Casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim.

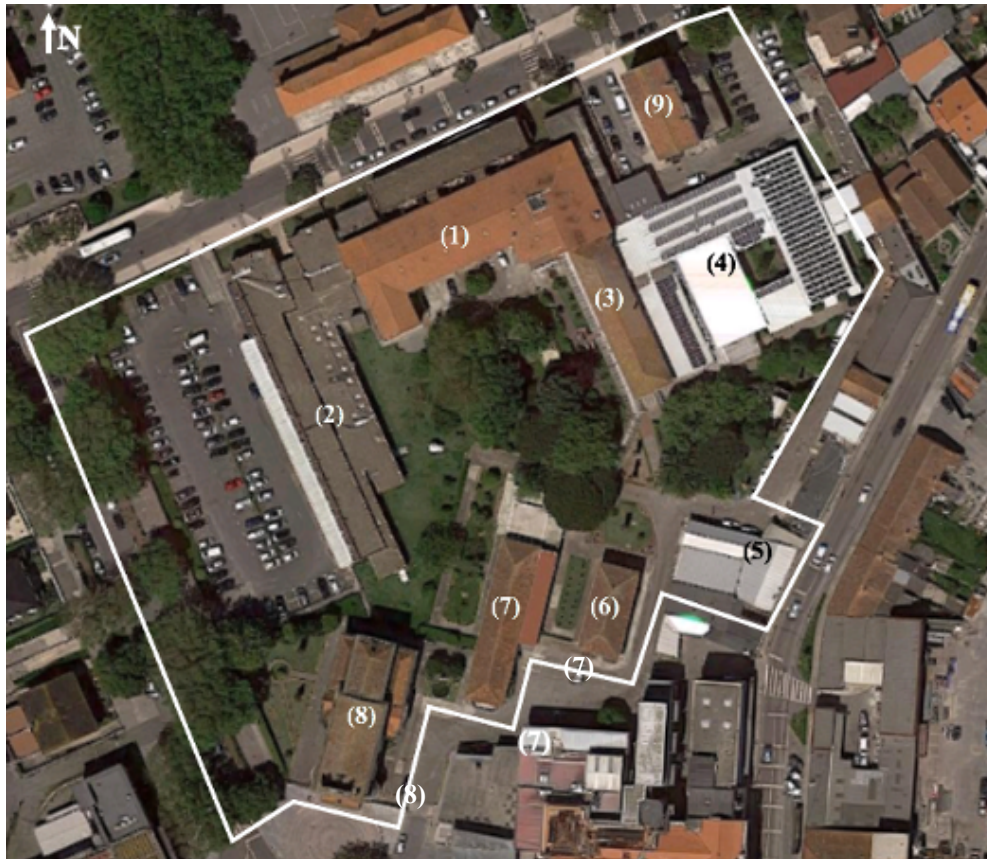


Figura 4.1-Imagem da Santa Casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim obtida por satélite (Google maps)

- (1)-Pensionato ; (2). - Lar de idosos; (3) - refeitório e fisioterapia; (4) - Edifício multimédia
(5) - Serviços administrativos; (6) - Museu; (7) - Provedoria; (8) - Igreja; (9) - Edifício Saúde.

O edifício do Pensionato da SCMPVarzim, encontra-se representado pelo número (1) na Figura 4.1, e é uma estrutura residencial para idosos com alguma autonomia (não acamados). Encontra-se em funcionamento desde 1983, tendo o edifício mais de 50 anos.

O edifício é constituído por 33 quartos de diferentes tipologias, num total de 72 camas, e conta também com algumas estruturas de apoio como gabinetes para o pessoal de saúde. Na Figura 4.2 encontram-se algumas fotografias do interior deste edifício.



Figura 4.2- Imagens do interior do edifício do Pensionato da SCMPVarzim

De acordo com informações prestadas pelo proprietário, o edifício tem em média uma ocupação de cerca de 100 pessoas, entre idosos residentes, pessoal auxiliar, pessoal médico, enfermeiras, auxiliares de saúde e outros.

Para efeitos do RECS [35], trata-se de um edifício classificado como um “Grande edifício de serviços” (GES) porque tem uma potência instalada superior a 25 kW e uma área útil superior a 1000 m². A sua área é de 2676 m² conforme levantamento efetuado, com um pé direito de 3 m e é constituído por dois pisos. Na Tabela 4.1 encontram-se as características gerais referentes à geometria do edifício em estudo.

Tabela 4.1 - Resumo das características gerais do edifício Pensionato da SCMPVarzim

Área total (m ²)		2676
Altura total (m)		6
Pé direito (m)	Piso 0	3,0
	Piso 1	3,0

A Figura 4.3 permite inferir que o eixo maior do edifício se encontra orientado sensivelmente segundo a direção Este - Oeste, estando assim as suas fachadas principais viradas para norte e para sul.

Conforme se pode observar, todas as fachadas estão em contacto com o exterior, com exceção de uma pequena parte da fachada virada a sul que se encontra em contacto com outro edifício.

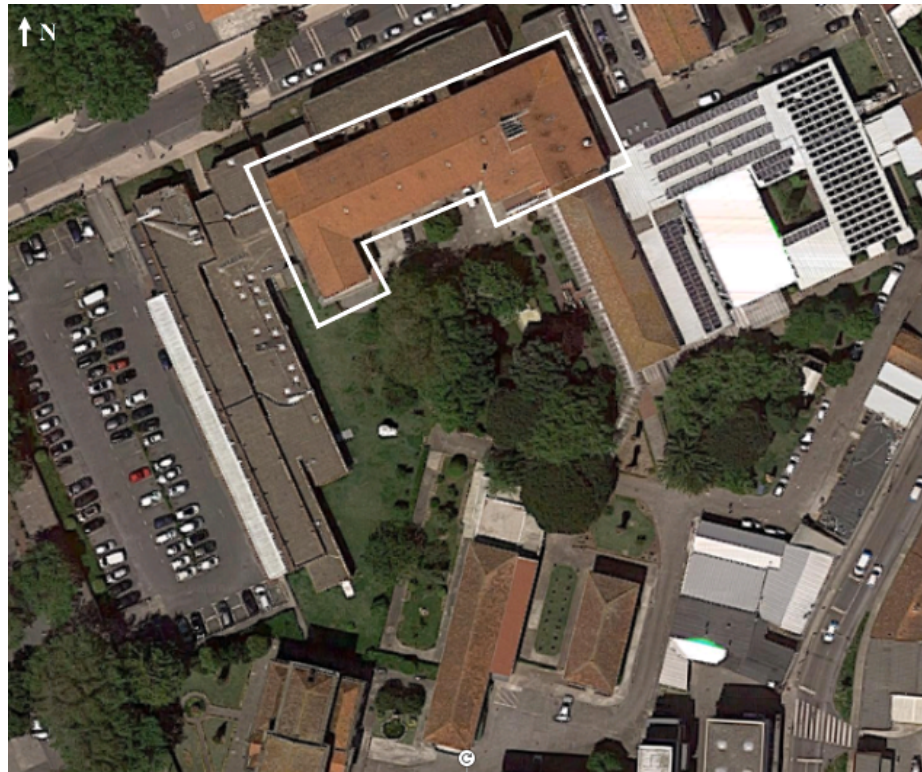


Figura 4.3 - Imagem do edifício da estrutura residencial para idosos da SCMPVarzim (Google maps)

4.2 Dados climáticos de referência da localização do edifício

A localização do edifício condiciona o seu desempenho energético na medida em que influencia as necessidades de energia para o seu aquecimento ou arrefecimento. O edifício objeto deste estudo situa-se no concelho da Póvoa do Varzim, distrito do Porto. Em termos geográficos a Póvoa de Varzim situa-se no Norte litoral de Portugal e tem um clima temperado marítimo.

Apresenta um clima ameno, com invernos suaves devido aos ventos de inverno que, normalmente, sopram de sul e sudoeste sendo pouco sujeita às intempéries extremas desta estação. O verão é ameno devido aos habituais nevoeiros e ventos de norte que surgem nesta estação do ano [40].



Figura 4.4 Mapa da localização do edifício em estudo - Póvoa do varzim

O edifício em estudo, como referido, situa-se no litoral norte sobre a influência marítima o que ameniza o verão, estando sujeito a uma baixa amplitude térmica, e pelo facto de ser uma

zona onde há muito vento, as habituais nortadas do verão, as necessidades de arrefecimento nesta estação podem facilmente ser solucionadas através da ventilação natural, com a simples abertura de uma janela.

O inverno é mais exigente pelo que as necessidades de aquecimento são mais importantes, principalmente por causa do frio e da humidade, por se situar no litoral. A Figura 4.5 mostra a distribuição das temperaturas durante o ano para o distrito do Porto, assim como a sua dispersão em cada um dos meses, tendo sido obtido através do *Climate Consultant*. A temperatura de conforto térmico entre os 20°C e os 25°C encontra-se assinalada a cinzento no gráfico e como facilmente se constata, existem mais pontos abaixo desta zona do que acima, confirmando o anteriormente referido de que as necessidades térmicas de aquecimento são mais significativas do que as de arrefecimento.

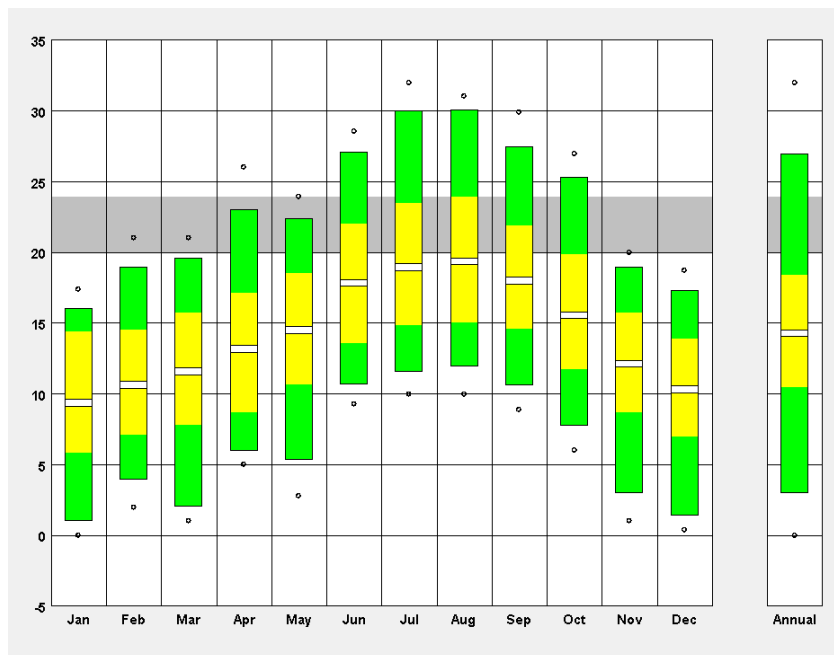


Figura 4.5- Gráfico da distribuição da dispersão das temperaturas anuais em (°C) para os dados climáticos do Porto calculados através do *Climate Consultant*

Nos termos Decreto-Lei n.º 118/2013 [13] e do despacho n.º 15793-F/2013 [43] são apresentados os parâmetros para o zonamento climático, dividindo Portugal continental em três zonas climáticas de verão designadas por V1, V2 e V3 e três zonas climáticas de Inverno, designadas por I1, I2 e I3, identificadas na Figura 4.6.

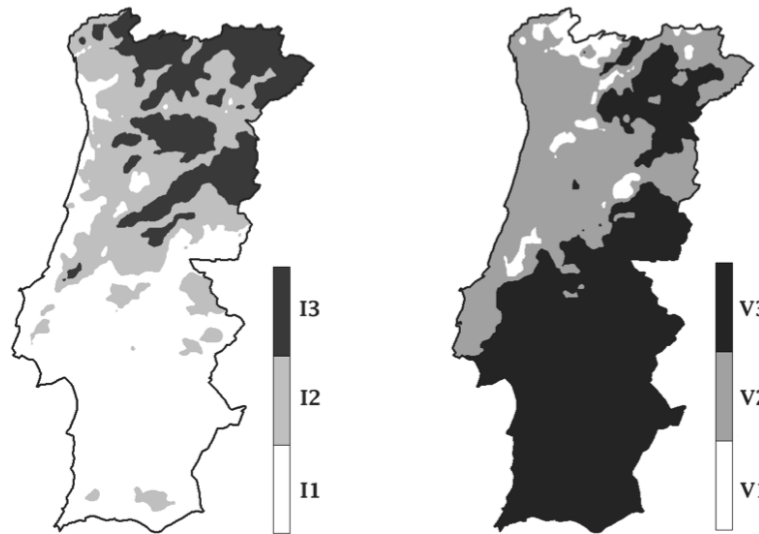


Figura 4.6 - Mapa das zonas climáticas de inverno (esquerda) e verão (direita) [43]

O critério para determinar a que zona climática pertence um determinado local encontra-se definido no despacho 15793-F/2013 [43] e é determinante para avaliar o desempenho energético global, de acordo com as exigências legais e regulamentares aplicáveis.

A determinação da zona climática de inverno do local em que se situa o edifício, é função dos graus-dias (GD) que são utilizados para caracterizar o rigor do inverno desse local. Os graus-dias correspondem à diferença entre a temperatura base, de 18 °C, e a temperatura exterior inferior a esta, ao longo do ano. Na Tabela 4.2 encontram-se os intervalos de variação dos GD, definidos pelo despacho n.º 15793-F/2013 [43], para a determinação da zona climática de inverno.

Tabela 4.2- Critérios para a determinação da zona climática de inverno [43]

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

Relativamente à identificação da zona climática de verão do local em que se situa o edifício, a mesma depende da temperatura média exterior durante os meses correspondentes a esta estação, ou seja, de $\theta_{ext,v}$. Os intervalos para a determinação da zona climática de verão encontram-se na Tabela 4.3

Tabela 4.3 - Critérios para a determinação da zona climática de verão [43]

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

A informação dos dados climáticos relativa ao Inverno (graus-dias) e ao Verão (temperatura média), para a Póvoa do Varzim, local onde se situa o edifício objeto deste estudo, foi obtida recorrendo à folha de cálculo do DGEG (software SCE.CLIMA), e consta da Figura 4.7.

Zona climática	Estatísticas climáticas														
NUTS 3: Grande Porto Latitude: 41,3 °N (nominal) Longitude: 8,6 °W (nominal) Altitude: 94 m (referência)	<table><tr><th>Referência</th><th>Este local</th></tr><tr><td colspan="2">Estação de aquecimento</td></tr><tr><td>Período:</td><td>6,2 6,2 meses</td></tr><tr><td>T média:</td><td>9,9 9,9 °C</td></tr><tr><td>Graus-dia:</td><td>1250 1250 °C</td></tr><tr><td colspan="2">Estação de arrefecimento</td></tr><tr><td>T média:</td><td>20,9 20,9 °C</td></tr></table>	Referência	Este local	Estação de aquecimento		Período:	6,2 6,2 meses	T média:	9,9 9,9 °C	Graus-dia:	1250 1250 °C	Estação de arrefecimento		T média:	20,9 20,9 °C
Referência	Este local														
Estação de aquecimento															
Período:	6,2 6,2 meses														
T média:	9,9 9,9 °C														
Graus-dia:	1250 1250 °C														
Estação de arrefecimento															
T média:	20,9 20,9 °C														
Local específico	Zonas regulamentares de verão e inverno														
Município: Póvoa de Varzim Altitude: 94 m	<table><tr><td>V 2</td><td>I 1</td></tr></table>	V 2	I 1												
V 2	I 1														

Figura 4.7 - Dados climáticos para a localização do edifício e zonas climáticas da Póvoa do Varzim (DGEG)

A Póvoa do Varzim situa-se então na zona classificada em I1 - V2 de acordo com o zoneamento climático, em que a influência marítima ameniza o verão, sendo neste caso as exigências climáticas de inverno maiores que no verão. Este facto é comprovado pelos dados da DGEG (software SCE.CLIMA) relativos às temperaturas anuais registadas, Figura 4.8.

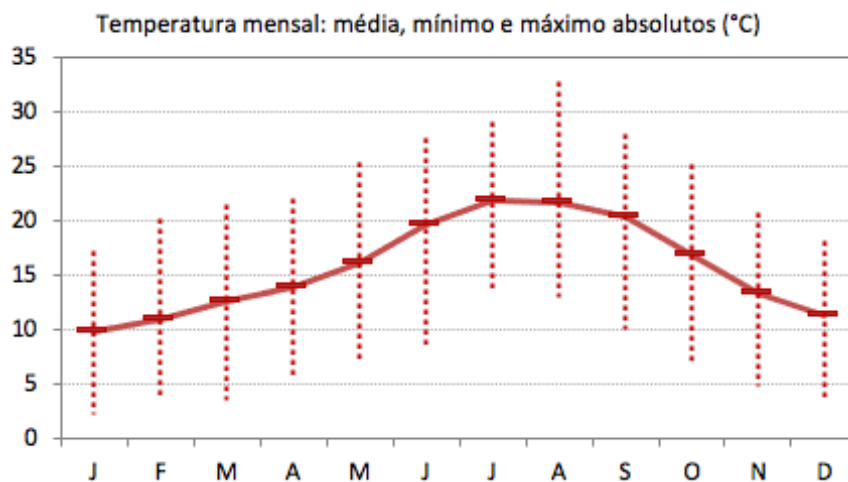


Figura 4.8 - Temperaturas mensais médias, mínimas e máximas (°C) da Póvoa do Varzim (DGEG)

A Figura 4.8 tem representadas as temperaturas máximas e mínimas de cada mês ao longo de um ano. Pode observar-se que a temperatura é, como seria de esperar para o clima de Portugal, mais elevada nos meses entre maio e setembro, em que a temperatura máxima ronda os 30°C, característica de clima ameno, sendo que nos meses de inverno a temperatura mínima poderia baixar até aos 2°C. Conclui-se então da análise destes dados que existe uma maior necessidade de recurso a aquecimento para haver conforto térmico, sendo as necessidades de arrefecimento reduzidas.

Além da temperatura exterior, o tipo de radiação solar a que o edifício está sujeito (irradiação direta ou difusa) influencia diretamente o seu desempenho energético. Assim, a irradiação solar afeta o conforto térmico dos ocupantes uma vez que no inverno é um ganho de calor que pode ser aproveitado para aquecer os espaços e no verão normalmente faz com que a temperatura interna aumente, sendo por isso necessário o seu controlo através de sistemas de arrefecimento (passivos ou ativos). A Figura 4.9 representa a média diária mensal da irradiação solar direta e difusa na Póvoa do Varzim.

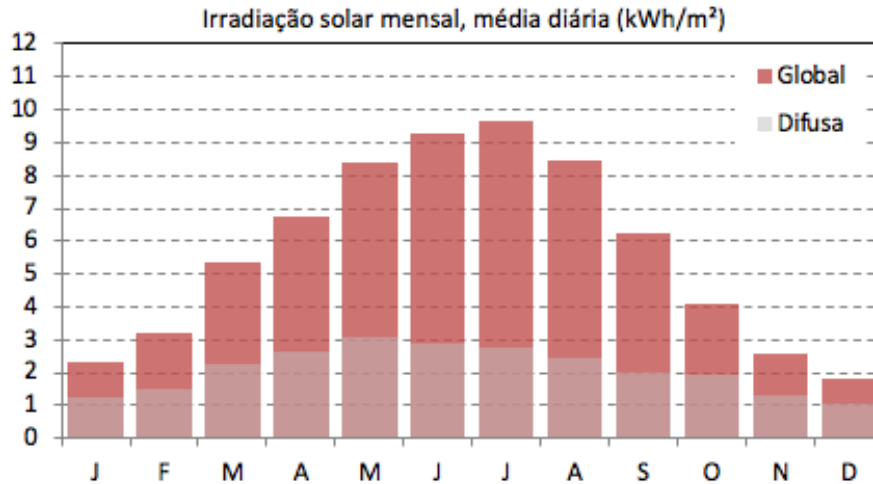


Figura 4.9 -Irradiação solar mensal média diária (KWh/m²) na Póvoa do Varzim (DGEG)

4.3 Caracterização do edifício

4.3.1. Envolvente

O desempenho energético de um edifício é função de várias variáveis tendo a envolvente, o chamado “*building envelope*”, um papel relevante, pois é responsável por cerca de 25% do uso total de energia de um edifício. O uso de materiais mais eficientes em termos térmicos nas envolventes exteriores, pode contribuir para a redução da energia necessária para o aquecimento e/ou arrefecimento dos espaços [44]. Elementos como paredes, coberturas, pavimentos, portas e vãos envidraçados contribuem para o contraste térmico entre o interior do edifício e o ambiente exterior, pelo que um bom isolamento térmico das estruturas ajuda a garantir estabilidade da temperatura interior, diminuindo obviamente o consumo de energia associado à climatização [44], segundo uma lógica de regime permanente, pois no verão isolamento a mais também poderá ser um problema.

As características construtivas do edifício em estudo, relativamente aos elementos da envolvente exterior, encontram-se detalhados nas tabelas seguintes, Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6, em que

- ρ – Massa volúmica, (kg/m^3);
- k – Condutibilidade térmica, (W/mK);
- R_{th} – Resistência total térmica ($\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$);
- R_{se} - Resistência térmica superficial exterior, ($\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$);
- R_{si} - Resistência térmica superficial interior, ($\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$);
- U - Coeficiente de transmissão térmica, ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$).

Tabela 4.4- Propriedades dos materiais das soluções construtivas da parede exterior

Parede exterior					
Camada	Designação	Espessura (mm)	ρ (kg/m ³)	k (W/mK)	Rth (m ² °C/W)
1	Rse	-	-	-	0,040
2	Reboco	20	2200	2,0	0,010
3	Tijolo 11cm	110	1200	0,5	0,220
4	Ar	50	1,225	-	0,180
5	Tijolo 15 cm	150	1200	0,5	0,300
6	Reboco	20	2200	2,0	0,010
7	Rsi	-	-	-	0,013
Soma		350	-	-	0,773
U (W/m²°C)		-	-	-	1,294

Tabela 4.5 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas no piso exterior

Piso exterior					
Camada	Designação	Espessura (mm)	ρ (kg/m ³)	k (W/mK)	Rth (m ² °C/W)
1	Rse	-	-	-	0,040
3	Betão maciço B15	203,2	2240	1,95	0,104
4	Rsi	-	-	-	0,100
Soma		-	-	-	0,244
U (W/m²°C)		-	-	-	4,098

Tabela 4.6 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas na cobertura exterior

Cobertura exterior					
Camada	Designação	Espessura (mm)	ρ (kg/m ³)	k (W/mK)	Rth (m ² °C/W)
1	Rse	-	-	-	0,040
2	Telha cerâmica	70	1900	1,3	0,054
3	Ar	150	1,225	-	0,180
4	Laje maciça	100	2350	2,0	0,050
5	reboco	20	2200	2,0	0,010
6	Rsi	-	-	-	0,17
Soma		340	-	-	0,504
U (W/m²°C)		-	-	-	1,984

Analisando os vários elementos construtivos utilizados na envolvente exterior, constata-se que o material construtivo mais utilizado é o tijolo (argila) que apresenta valores interessantes a nível de condutibilidade térmica e de resistência à compressão.

Nas tabelas Tabela 4.7, Tabela 4.8 e Tabela 4.9 encontram-se as propriedades dos materiais utilizadas nas paredes, tetos e pavimento interiores.

Tabela 4.7 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas na parede interior

Parede Interior					
Camada	Designação	Espessura (mm)	ρ (kg/m ³)	k (W/mK)	Rth (m ² °C/W)
1	Reboco	20	2200	2,0	0,010
2	Bloco de betão normal	300	2240	-	0,370
4	Reboco	20	2200	2,0	0,010
Soma		340	-	-	0,390
U (W/m ² °C)		-	-	-	2,564

Tabela 4.8 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas no teto interior

Teto Interior					
Camada	Designação	Espessura (mm)	ρ (kg/m ³)	k (W/mK)	Rth (m ² °C/W)
1	Betão maciço B15	203,2	2240	1,95	0,104
U (W/m ² °C)		-	-	-	9,615

Tabela 4.9 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas no pavimento interior

Pavimento Interior					
Camada	Designação	Espessura (mm)	ρ (kg/m ³)	k (W/mK)	Rth (m ² °C/W)
1	Betão maciço B15	203,2	2240	1,95	0,104
U (W/m ² °C)		-	-	-	9,615

4.3.2. Vãos envidraçados

As superfícies envidraçadas são um fator importante no que diz respeito à eficiência térmica do edifício, pois podem contribuir para a entrada de calor no inverno sem custos adicionais, para além de constituírem saídas de calor no Verão. Ora o edifício em estudo é composto por um total de 162,5 m² de área de envidraçados, conforme levantamento efetuado. Além da área correspondente aos vãos envidraçados deve-se também ter em consideração na avaliação, quer o tipo de vidro utilizado quer o tipo de caixilharia. Como este edifício já é antigo possui apenas um tipo de envidraçados, onde são utilizados vidros duplos incolores do tipo *PLANILUX* da *Saint Gobain* e caixilharia metálica de alumínio sem cortes térmicos. A solução construtiva utilizada nos vãos envidraçados encontra-se descrita na Tabela 4.10, em que U_{env} representa o coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados.

Tabela 4.10 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas utilizadas nos vãos envidraçados

	Envidraçado
Tipo de vidro	duplo
Tipo de caixilharia metálica	Sem corte térmico
Espessura da lamina de ar	6 mm
U_{env}	3,5 (W/m ² °C)

Uma vez que os vãos envidraçados não possuem proteções solares o fator solar a considerar é $g_{\perp}$ (fator solar do vidro para uma incidência solar normal à superfície) é de 0,75 o qual foi retirado diretamente da tabela 12 do despacho 15793-K/2013 [46].

4.3.3. Inércia térmica

A inércia térmica de um edifício consiste na sua capacidade de reduzir a transferência ou transmissão de calor, contrariando as variações de temperatura no seu interior. Assim sendo, a inércia térmica influencia o comportamento do edifício, tanto no inverno, ao determinar a capacidade de utilização dos ganhos solares, como no verão, ao afetar a capacidade do edifício para absorver os picos de temperatura.

Ou seja, a inércia térmica (I_t) de um edifício representa a capacidade de armazenamento de calor, o que depende da massa superficial útil de cada um dos elementos de construção. A inércia térmica ou massa superficial útil por metro quadrado de área de pavimento é calculada recorrendo à expressão (4.1), em que o cálculo e terminologia empregue vêm descritos no n.º 2 do anexo VII do RCCTE [46].

$$I_t = \frac{\sum_i M_{si} \times S_i \times r_i}{A_p} \quad (4.1)$$

em que:

- M_{si} - Massa superficial do elemento i (kg/m²);
- r – Fator de redução da massa superficial útil, com valores entre 0 e 1;
- S_i - Área de superfície interior do elemento i (m²);
- A_p - Área útil de pavimento (m²).

Em termos regulamentares foram definidas três classes de inércia térmica, a fraca, a média e forte, dependendo do valor de I_t . A Tabela 4.11 que se segue indica os valores associados a cada uma das classes.

Tabela 4.11 - Classes de inércia térmica, I_t [46]

Classe da Inercia Térmica	I_t (kg/m ²)
Fraca	$I_t < 150$
Média	$150 \leq I_t \leq 400$
Forte	$I_t > 400$

A inércia térmica calculada para o edifício foi de 1073 (kg/m²), 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.

4.3.4. Equipamentos de climatização

Os sistemas de climatização têm um papel essencial nos edifícios, pois são os equipamentos que maior impacto têm no conforto térmico. Assim, os equipamentos a instalar num edifício são também um fator de extrema importância a ter em consideração, não só pelo consumo energético que representam, e pelos seus custos de investimento e manutenção, mas também pela mais-valia ao nível do bem-estar que proporcionam, bem como pelos efeitos que podem ter ao nível da saúde dos utentes do edifício.

O sistema de climatização implementado no edifício do Pensionato funciona de forma centralizada para as necessidades de aquecimento, sendo o aquecimento interior garantido por intermédio de uma caldeira. Em termos de instalação, verifica-se que uma das caldeiras está afeta só ao aquecimento, enquanto a outra caldeira produz toda a água quente sanitária (AQS) para as necessidades do edifício. Ambas as caldeiras são da Vulcano cujo modelo é Aquastar ZSC 35-3 MFA, tendo cada uma das caldeiras uma potência de 35 kW, e sendo o combustível das caldeiras o gás natural. As fichas técnicas encontram-se no Anexo C.

Em relação aos rendimentos, na ficha técnica anteriormente referida consta um valor de 93,7%. No entanto, o valor de rendimento de 93,7% é obtido através dos ensaios realizados pela marca, em condições nominais de funcionamento. Ora, as caldeiras em análise têm cerca de 15 anos de vida em pleno funcionamento, pelo que, considerando, que raramente as caldeiras conseguem ter uma potência máxima acima dos 90%, e que com vários anos de vida e deficientes manutenções apresentam valores de rendimento na ordem dos 80% [51], adotou-se neste trabalho um valor intermédio de 85%. As fotografias das caldeiras encontram-se na imagem Figura 4.10.



Figura 4.10 - Caldeiras na central térmica da santa casa da Misericórdia da Póvoa do Varzim

4.3.5. Outros dados relevantes para o consumo energético do edifício

a) Ocupação

A ocupação é um dos pontos críticos na análise de um edifício, sendo que ao longo do dia o número de ocupantes do edifício é variável, e, além disso, as necessidades térmicas de conforto também variam em função da taxa de ocupação. Na Portaria 349-D/2013 [45] é referido que nos casos em que não existe informação sobre os perfis e demais elementos necessários à caracterização da utilização dos espaços, e não sendo possível estabelecer um

perfil e densidade respetivo, podem ser adotados os perfis e densidades previstos no antigo Decreto-Lei n.º 79/2006 [47].

Neste caso, e devido à pandemia da Covid-19, não foi possível efetuar o registo de utilização do edifício, pois as visitas ao edifício foram muito poucas e bastante condicionadas, pelo que se adotaram os padrões de referência de utilização indicados no referido Decreto-Lei n.º 79/2006 [47]. Estes padrões de referência apresentam parâmetros para as diferentes tipologias de edifícios, sendo o caso em estudo enquadrado nos estabelecimentos de saúde com internamento.

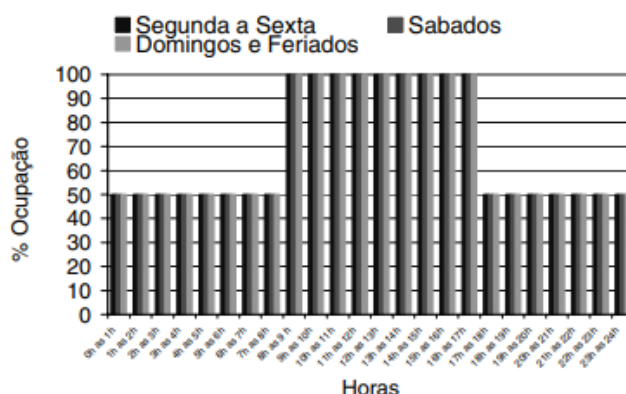


Figura 4.11 - Densidade ocupacional de referência para estabelecimento de saúde com internamento [47]

De forma a se poder avaliar o impacto deste parâmetro no consumo energético do edifício, recorreu-se aos dados fornecidos na legislação, designadamente no RECS, que indica os valores a considerar de acordo com a tipologia do edifício, conforme Tabela 4.12. Assim, sendo o edifício em causa, um estabelecimento de saúde com internamento, para os efeitos de cálculo do consumo energético do edifício, deve ser adotada uma densidade de 10 W/m² no que para os equipamentos.

Tabela 4.12 - Dados do RECS para estabelecimentos de saúde com internamento

Estabelecimentos de saúde com internamento	
Perfis variáveis de acordo com os valores das tabelas	
	Densidades
Ocupação	20 m ² /Ocupante
Iluminação	-----
Equipamento	10 W/m ²

b) Iluminação

A iluminação é um dos principais fatores que concorre para os gastos energéticos de um edifício, tendo particular relevância nos edifícios de serviços. O recurso a sistemas de iluminação artificial mais eficientes pode, simultaneamente, proporcionar melhores ambientes de vida e de trabalho e contribuir para a redução global do consumo de energia e das emissões de gases com efeito de estufa.

As necessidades de iluminação dependem do espaço, da densidade ocupacional, e do horário de funcionamento. De acordo com o Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de abril [47], as necessidades de iluminação para um estabelecimento de saúde com internamento, tipologia em que se enquadra o edifício em análise, constam da Figura 4.12.

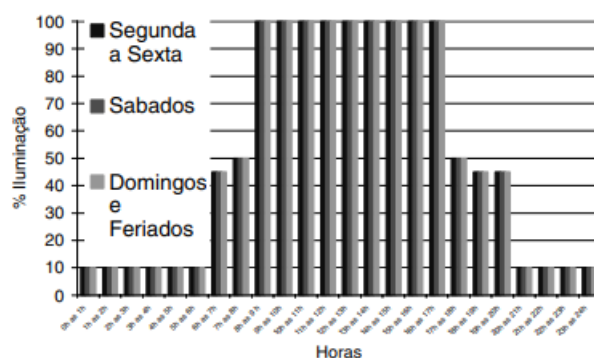


Figura 4.12 - Dados de referência para iluminação de um estabelecimento de saúde com internamento [47]

No edifício em estudo, atualmente a iluminação artificial é efetuada com recurso a lâmpadas fluorescentes lineares TC-D que se encontram encastradas ou suspensas no teto das respetivas divisões, variando assim a luminária e o balastro, em função do pé direito da divisão. Os espaços comuns de circulação são iluminados por intermédio de conjuntos de duas lâmpadas fluorescentes compactas tipo TLD36 com uma potência individual de 36 W, perfazendo desta forma uma potência total de cerca de 93,6 W (lâmpadas mais balastro). Nas restantes divisões são utilizados conjuntos de duas lâmpadas fluorescentes compactas TC-D com uma potência individual de 18 W, perfazendo desta forma uma potência total de cerca de 46,8 W (lâmpadas mais balastro). Sendo a potência instalada de iluminação de 6 W/m².

Tabela 4.13 - Características do equipamento de iluminação

Lâmpada	Balastro	Nº de lâmpadas	Potência total
TC-D 18 W	ferromagnético	162	7581,6W
TLD 36 W	ferromagnético	90	8424W

c) Equipamentos

Os consumos associados à utilização dos equipamentos também devem ser considerados, tendo particular relevância em edifícios de serviços. Os valores de referência a utilizar para este edifício são os constantes na Tabela 4.12, que dependem da ocupação que se encontra indicada na Figura 4.11, de acordo com a legislação em vigor, designadamente com o RECS [47]. Como já referido anteriormente, e devido à pandemia da Covid-19, não foi possível efetuar o registo de utilização do edifício na data das visitas, pelo que se adotaram os padrões de referência de utilização indicados no referido Decreto-Lei nº 79/2006 [47].

4.3.6. Consumos de Água Quente Sanitária (AQS)

Em relação aos consumos de AQS, de acordo com a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), o consumo diário é de 75 litros/pessoa [48] tendo-se adotado este valor para os consumos diários de AQS dos utilizadores idosos. Tendo presente as informações transmitidas pela direção da SCMPVarzim a ocupação média do edifício é de cerca de 100 pessoas distribuídas do seguinte modo: 72 idosos em permanência alojados no Pensionato e uma média de 30 colaboradores diários entre pessoal auxiliar, pessoal médico, enfermeiras, auxiliares de saúde e outros. O valor utilizado para os consumos diários de AQS para os colaboradores foi o valor médio de 40 litros/pessoa adotado no estudo da SCE [67], uma vez que estes não permanecem 24h no Pensionato, ao contrário dos idosos. Foi também considerado um valor de consumo de AQS para limpeza/higienização

dos espaços e outros, de 10% seguindo o valor indicativo do estudo [67]. Na Tabela 4.14 encontram-se discriminados os valores de consumos de AQS anuais considerados,

Tabela 4.14 - Consumo de AQS anuais

Variável	Valor utilizado
Nº de pessoas consideradas	72
Consumo médio por pessoa	75 Litros/dia
Consumo anual de AQS nos quartos	A = 1971000 Litros/ano
Nº de colaboradores que utilizam o edifício	30
Consumo médio por colaborado	40 Litros/dia
Consumo anual de AQS dos colaboradores	B = 438000 Litros/ano
Consumo anual de AQS no edifício (A+B) x 1,10	2649900 Litros/ano

As necessidades de energia relativas à preparação de água quente sanitária (AQS) são calculadas através da Portaria n.º 349-D/2013 atualizada pela Portaria 17-A/2016 [45],

$$Q_a = \frac{c_{aqs} \times 4,187 \times \Delta T}{3600} \text{ (kWh/ano)} \quad (4.2)$$

em que,

Q_a - Representa a energia global necessária para a preparação de AQS, (kWh/ano);

c_{aqs} - Representa o consumo anual de AQS, (l/ano);

ΔT - Aumento de temperatura necessário à preparação de AQS, (°C).

Neste caso considerando o valor de 30°C para o aumento de temperatura necessário para a preparação de AQS, tendo em consideração o disposto no Decreto-Lei n.º 118/2013[13], para efeitos de SCE, que entende-se por AQS a “...água potável aquecida em dispositivo próprio, com energia convencional ou renovável, até uma temperatura superior a 45°C, e destinada a banhos, limpezas, cozinha ou fins análogos.” resulta que, $Q_a = 92459$ (kWh/ano).

4.4 Desempenho energético do edifício

4.4.1 Necessidades térmicas

Para a análise do desempenho energético do edifício utilizou-se o programa de modelação Sketchup. Este software é o primeiro interface para o programa de simulação energética TRNSYS. O edifício Pensionato da SCMPVarzim foi modelado no Sketchup de acordo com o projeto de arquitetura, conforme Figura 4.13, permitindo numa fase posterior introduzir todas as suas características, desde pormenores construtivos, vãos envidraçados, perfis de utilização, equipamentos, iluminação, atividade, entre outros, correspondentes a cada zona específica de utilização.

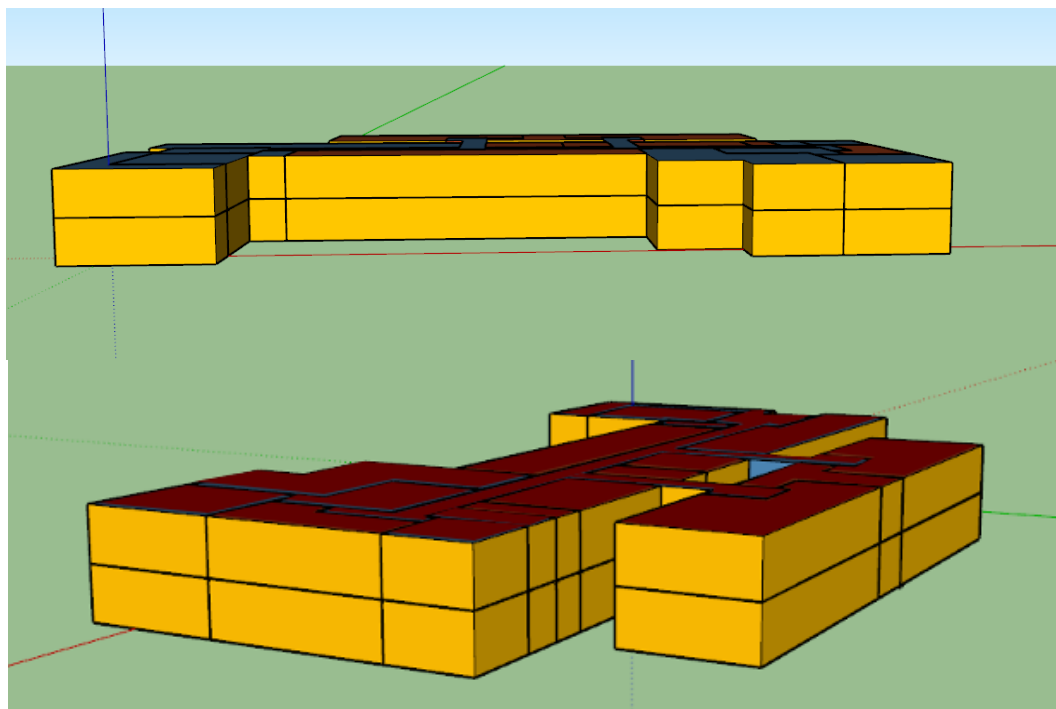


Figura 4.13 - Modelo geométrico 3D do edifício do Pensionato

No modelo geométrico os elementos opacos aparecem a amarelo, as coberturas aparecem a castanho, sendo os vãos envidraçados posteriormente adicionados no software TRNSYS. No edifício em estudo existem vários tipos de espaços com necessidades térmicas diferente, nomeadamente, espaços comuns, quartos, gabinetes, casas de banho, entre outros. Estes diferentes espaços são caracterizados, em termos energéticos, associando-se a cada um deles uma carga térmica de aquecimento e de arrefecimento e definindo-se assim as diferentes zonas térmicas do edifício. As diferentes zonas térmicas foram caracterizadas de acordo com o estabelecido na Portaria n.º 349-D/2013 atualizada pela Portaria 17-A/2016 [45], em termos de volumetria, elementos que constituem a envolvente, e de ganhos internos resultantes da ocupação, iluminação, equipamento. Para cada uma das zonas térmicas encontra-se associado um consumo horário de aquecimento, para cada hora do ano. Encontram-se no anexo B as diferentes zonas térmicas consideradas no edifício.

As simulações dos consumos associados às necessidades de aquecimento foram efetuadas com recurso ao software TRNSYS, tendo-se obtido os valores para cada uma das zonas térmicas definidas. Estas zonas foram definidas as quais foram posteriormente agrupadas, para se obter as necessidades térmicas de aquecimento para a totalidade do edifício. Embora o edifício em análise não possua qualquer sistema de arrefecimento, efetuaram-se também as simulações para se obter as necessidades de arrefecimento. As necessidades de arrefecimento são essenciais para equacionar a proposta de instalação de equipamento para arrefecimento, a fim de contribuir para a melhoria do conforto térmico do edifício.

Na Tabela 4.15 apresentam-se os resultados da compilação dos consumos de energia final, por área climatizada, e por área total, em (kWh/m²ano), obtidos através do software TRNSYS, bem como os valores de consumo de energia final total em (MWh/ano). Nas últimas duas linhas da Tabela 4.15 identificam-se as necessidades térmicas de aquecimento e arrefecimento anuais.

Tabela 4.15 - Consumos energéticos obtidos com simulação no TRNSYS

Energia por área climatizada (kWh/m ² ano)	395,4
Energia por área total (kWh/m ² ano)	306,4
Energia final (MWh/ano)	819,8
Energia elétrica (MWh/ano)	189,1
Necessidades térmicas de aquecimento (MWh/ano)	587,5
Necessidades térmicas de arrefecimento (MWh/ano)	43,1

No gráfico da Figura 4.14 encontra-se a dispersão diária dos consumos energéticos referentes ao aquecimento, necessários para manter o edifício do Pensionato com a temperatura apropriada.

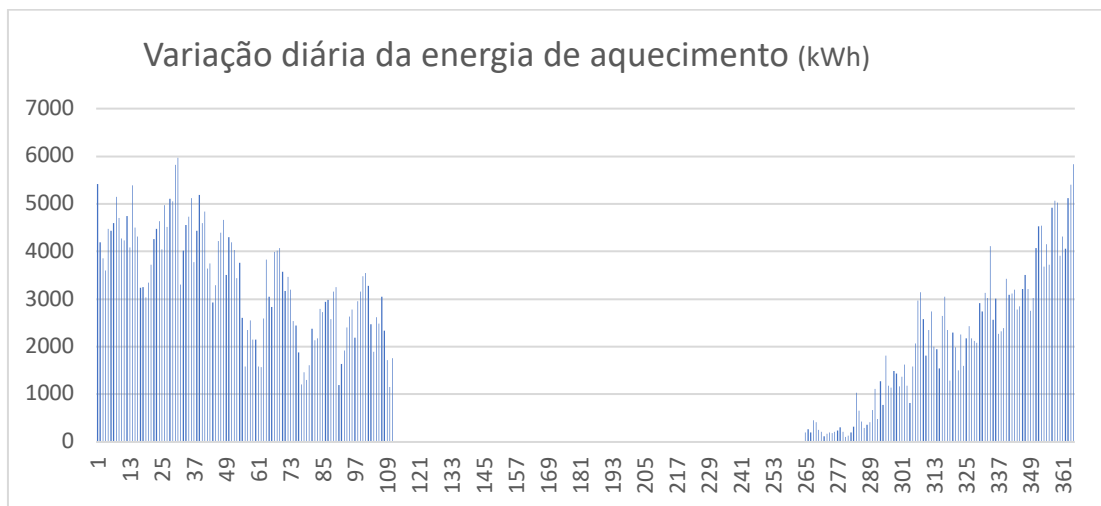


Figura 4.14 - Variação diária da energia de aquecimento do edifício, obtidos pelo TRNSYS em kWh

Conforme se pode verificar as simulações estão adequadas, pois no método utilizado fixou-se a temperatura ao longo do ano em 20°C de acordo com o procedimento estipulado no Decreto-Lei nº 80/2006 [80].

Para uma melhor análise da energia de aquecimento agruparam-se os dados por meses, encontrando-se na Figura 4.15 os valores mensais.

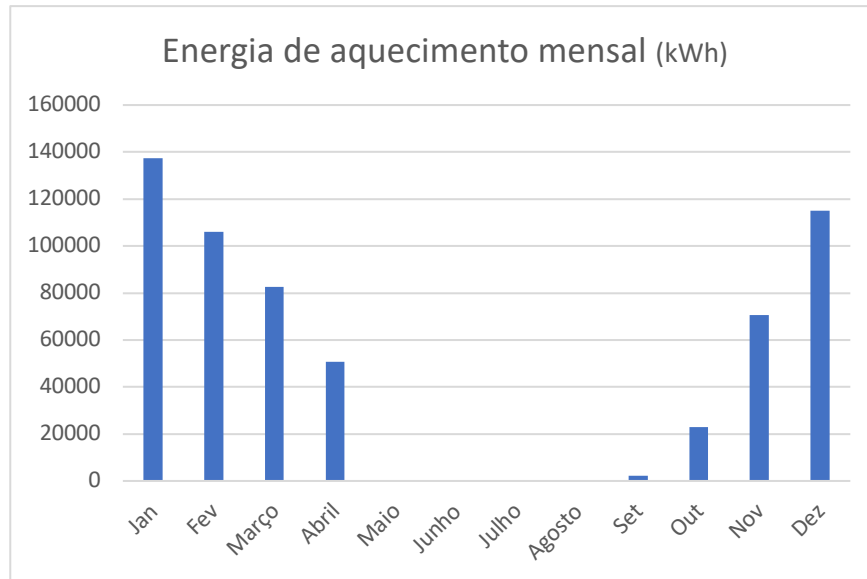


Figura 4.15 - Energia de aquecimento mensal obtido pelo TRNSYS em kWh

Resulta então desta tabela, que os consumos energéticos para o aquecimento ocorrem entre os meses de setembro e abril, sendo o mês de dezembro e de janeiro que apresentam os maiores consumos, ou seja, os meses em que há mais necessidades de aquecimento. Estes resultados são coerentes, pois tendo em consideração a zona climática onde se insere este edifício, I1-V2, são estes os meses onde habitualmente são registados os valores mais baixos de temperatura exterior e onde se regista menor incidência de irradiação solar, havendo mais necessidade de recurso a aquecimento para garantir conforto térmico.

Apesar do edifício não apresentar qualquer tipo de equipamento técnico destinado ao arrefecimento, como referido, foram efetuadas as simulações relativas às necessidades térmicas de arrefecimento. O gráfico da Figura 4.16 apresenta a dispersão das necessidades de arrefecimento ao longo do ano.

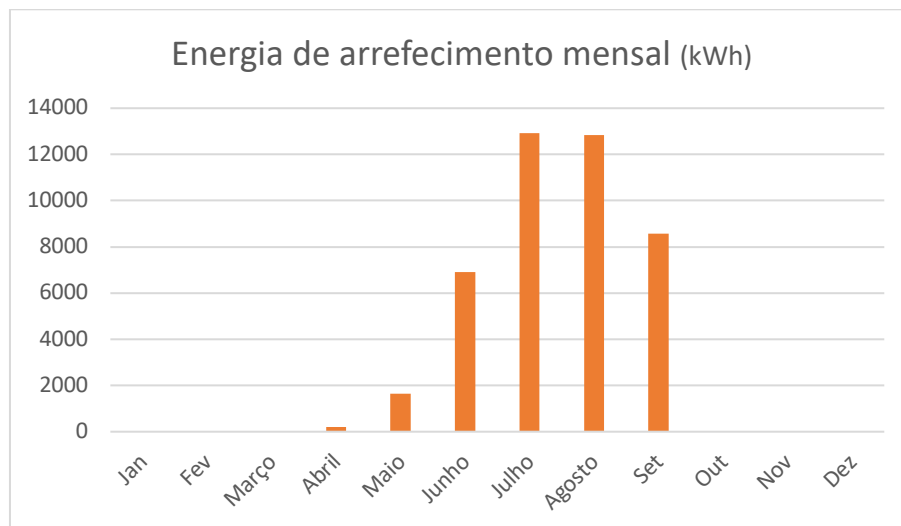


Figura 4.16 - Energia mensal para arrefecimento obtidos pelo TRNSYS em kWh

Estes valores confirmam o esperado, pois como já tinha sido referido, o edifício em estudo situa-se no litoral norte sobre a influência marítima o que ameniza o verão havendo poucas necessidades de arrefecimento, sendo o inverno mais exigente pelo que as necessidades

de aquecimento são mais importantes. O peso das necessidades térmicas de aquecimento é significativamente maior, representando cerca de 93% do total das necessidades energéticas, conforme consta do gráfico da Figura 4.17, onde se apresenta o peso comparativo das necessidades térmicas de aquecimento e de arrefecimento anuais.

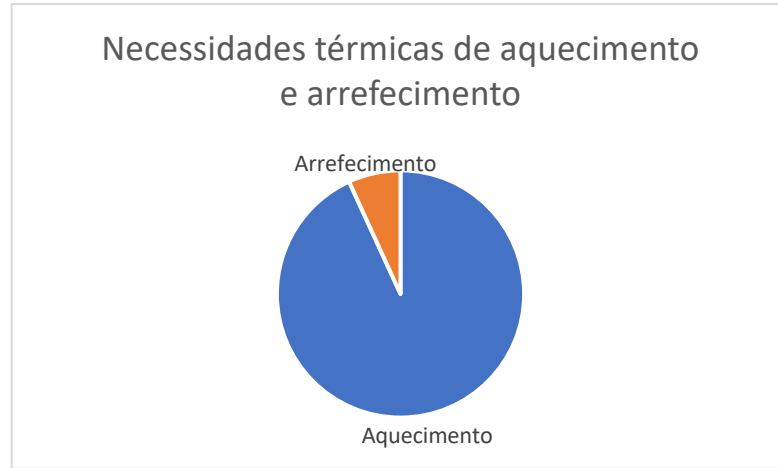


Figura 4.17 - Comparação das necessidades térmicas anuais de aquecimento e arrefecimento

Como o edifício não tem qualquer sistema de arrefecimento apenas serão calculados os gastos atuais referentes ao aquecimento.

Como referido na seção 4.3.4 a caldeira destinada ao aquecimento é uma Vulcano Aquastar ZSC 35-3 MFA, com 35 kW de potência nominal, com rendimento, de acordo com a ficha técnica, Anexo C, de 93,7%. No entanto, como também já explicado, adotou-se o valor de rendimento de 85% pois o valor de rendimento de 93,7% é um valor de ensaio obtido pela marca que é realizado em condições ótimas de funcionamento, e com a caldeira tem cerca de 15 anos de vida em permanente exploração, para além de que raramente as caldeiras conseguem ter uma potência máxima acima dos 90% [51].

O gás natural anual é dado pela razão entre as necessidades térmicas de aquecimento e o rendimento da caldeira. Obtém-se assim,

$$N_{comb} = \frac{N_{aq}}{\eta_{cald}} = \frac{587542}{0,85} = 691221 \text{ kWh/ano} \quad (4.3)$$

em que,

N_{comb} - Consumo de combustível em (kWh/ano);

N_{aq} - Necessidades térmicas de aquecimento em (kWh/ano);

η_{cald} - Rendimento da caldeira.

4.4.2 Consumos anuais de energia

Resumem-se na Tabela 4.16 os consumos de energia útil anuais em kWh, para aquecimento, AQS, iluminação e outros equipamentos.

Tabela 4.16 - Consumos anuais do edifício Pensionato

Consumos de energia útil	Situação atual	Totais
Tipos de utilização	(kWh/ano)	(kWh/ano)
Aquecimento	691221	783680
AQS	92459	
Arrefecimento	---	---
Iluminação	46994	189131
Equipamentos	142137	

No gráfico da Figura 4.18 apresenta-se o peso associado aos diferentes tipos de utilização da energia útil no edifício, com base nos resultados da simulação anual, verificando-se que o aquecimento é responsável pela maior percentagem de consumo energético do edifício, correspondendo a 71% do consumo total de energia, seguido do consumo de energia para a iluminação, que representa 14% dos consumos de energia.

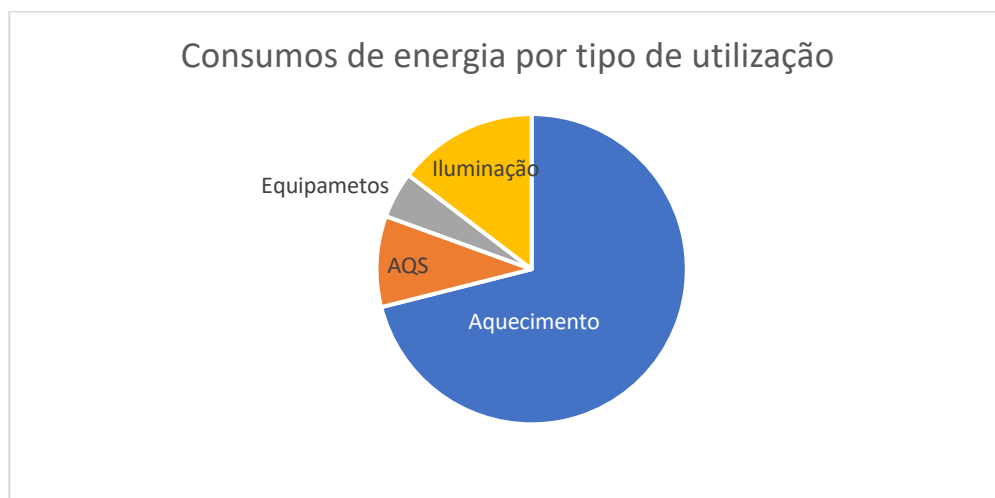


Figura 4.18 - Consumos de energia por tipo de utilização

Relativamente aos consumos por forma de energia constata-se que as necessidades de gás correspondem a 80% dos consumos de energia, conforme se pode observar no gráfico da Figura 4.19.

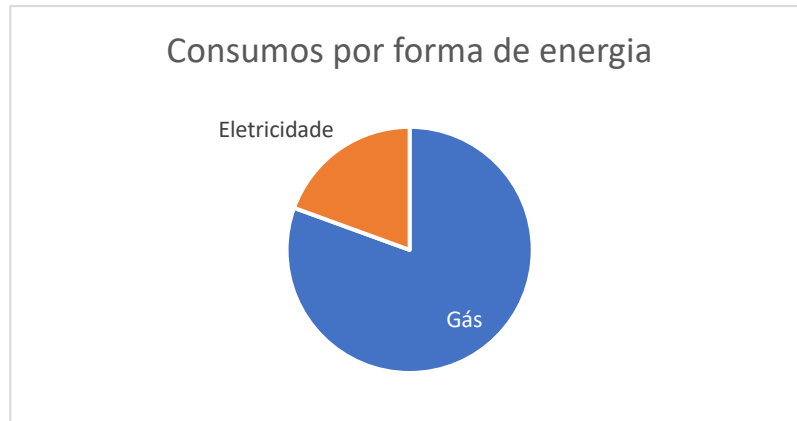


Figura 4.19 - Consumos por forma de energia

Tendo este trabalho como objetivo identificar medidas de melhoria que aumentem a eficiência energética e a melhoria do conforto dos seus utilizadores deve-se ter também em consideração a viabilidade económica das diferentes medidas.

Assim, para determinar o retorno da implementação das medidas de melhoria é necessário estimar a poupança que lhe está associada, o que resulta diretamente dos atuais custos com o consumo energético do edifício. Relativamente aos custos de energia, a orientação da DGEG ([73]) aponta no sentido de serem utilizados os tarifários associados a cada uma das formas de energia do edifício em análise. No entanto, neste caso concreto, devido ao ano atípico que vivemos e aos impedimentos de acesso ao edifício devido à pandemia COVID19, não foi possível obter os valores reais do tarifário em uso pelo promotor. Como tal, e por tal motivo, foram utilizados os valores indicativos utilizados nos simuladores do “Programa de Eficiência Energética na administração pública” ([74]), resultando no seguinte

- Gás natural: 0,10 €/kWh;
- Eletricidade: 0,20 €/kWh.

Na Tabela 4.17 encontram-se estimados os custos totais anuais com os consumos de energia do edifício,

Tabela 4.17 - Estimativa dos custos atuais com energia com aplicação das medidas

Tipo de energia	Gastos anuais (€)
Gás natural	78.368,00
Eletricidade	37.826,22
Total	116.194,22

Como se verifica atualmente, os gastos anuais com energia são elevados e têm um peso significativo no orçamento da SCMPVarzim pelo que a implementação de melhorias de desempenho energético que baixem estes custos são uma efetiva mais-valia que pode reduzir significativamente os custos de exploração.

Acresce ainda o facto de que a sua requalificação energética é crucial para a obtenção de acordos de cooperação com a Segurança Social.

5 Medidas de melhoria

O presente capítulo tem como objetivo descrever as várias opções de reabilitação energética propostas para o edifício Pensionato. Assim, nas secções que se seguem encontram-se caracterizadas, do ponto de vista técnico e económico, todas as soluções analisadas. Neste sentido, são também caracterizados os métodos utilizados na análise da viabilidade técnica e económica das várias propostas de reabilitação energética, bem como os cenários macroeconómicos desenvolvidos e considerados na análise referida.

O conforto térmico no edifício do Pensionato é um requisito que não pode ser descurado dada a funcionalidade do edifício, que é estrutura residencial para idosos. As exigências de conforto térmico, como referido no capítulo anterior, têm um peso elevado no consumo de energia, pelo que é necessário dotar o edifício com soluções construtivas e sistemas técnicos mais eficientes.

A melhoria da eficiência energética do edifício Pensionato da SCMPVarzim é o principal foco do trabalho desenvolvido. É também objeto de análise a promoção da eficiência energética numa perspetiva mais ampla, com a incorporação de fontes renováveis de energia, com o objetivo de transformar o edifício num edifício com necessidades quase nulas de energia, ou seja num nZEB.

Foram assim identificadas várias medidas de melhoria que foram analisadas de acordo com a hierarquia apresentada no despacho 7113/2015 [54], conforme se descreve:

- na envolvente exterior do edifício analisando-se os vãos envidraçados, paredes e coberturas exteriores;
- ao nível dos equipamentos e sistemas técnicos utilizados no edifício, tanto de climatização como de iluminação;
- introdução de sistemas com recurso a fontes de energias renováveis nomeadamente solar.

Será também efetuada uma análise da viabilidade económica das medidas de melhoria, determinando-se o período de retorno do investimento. Para o efeito é necessário estimar o custo de investimento, a poupança de energia e a consequente redução de custos. De acordo com o despacho 15793-L/2013 [59], o período simples de retorno (PSR) do investimento é dado pela razão entre o valor do custo total do investimento (C) em €, e o valor da poupança anual (P) em €/ano, resultante da aplicação da medida de melhoria em estudo, determinada com base em simulações anuais, ou seja,

$$PSR = \frac{C}{P} \text{ (anos)} \quad (5.1)$$

Os custos de implementação das medidas (C), devem ser obtidos com base nos valores atuais de mercado, para as soluções previstas na medida, não se devendo considerar o IVA, dadas as características específicas deste imposto.

O valor da poupança (P) é então dado pela diferença entre os custos de exploração inicial e os custos de exploração final,

$$P = \text{Custo exploração}_{\text{inicial}} - \text{Custo exploração}_{\text{final}} \text{ (anos)} \quad (5.2)$$

que deverão ser estimados com base nos consumos de energia final e nos respetivos custos associados a cada uma das formas de energia consumida.

5.1 Redução das necessidades energéticas pela melhoria da envolvente

5.1.1 Envolvente Opaca

A implementação de soluções construtivas com um grau de eficiência elevado, contribui para a redução da energia necessária para o aquecimento dos espaços, pelo que a envolvente opaca é uma das melhorias a analisar neste edifício. Como o edifício é antigo, tendo mais de 50 anos, a envolvente não cumpre os requisitos regulamentados na portaria n.º 349-D/2013 e n.º 17-A/2016 [45], e como já referido, tem um papel relevante no desempenho energético do edifício. Assim sendo é necessário melhorar os valores do coeficiente de transferência de calor (U) dos elementos construtivos da envolvente opaca do edifício.

A adoção dos sistemas de isolamento térmico pelo exterior, ETCIS (*External Thermal Insulation Composite Systems*), ou seja, a aplicação de um sistema de isolamento compósito térmico pelo exterior nos elementos opacos verticais surge como uma das melhores soluções para alcançar os requisitos térmicos impostos pela portaria n.º 349-D/2013 e n.º 17-A/2016 [45]. Atualmente existem diversos tipos de isolamento térmico utilizados no sistema ETICS, o poliestireno expandido (EPS), o poliestireno extrudido (XPS), a lã de rocha (MW) e o aglomerado de cortiça expandida (ICB). Pelo facto dos trabalhos de aplicação do sistema serem realizados no exterior sem haver necessidade de utilizar os espaços interiores, esta solução tem grandes vantagens em intervenções de reabilitação.

As medidas de melhoria passivas ao nível da envolvente definidas na ELPRE [30], encontram-se na Tabela 5.1. Estas melhorias, ao nível da envolvente, foram estipuladas tendo como referência o critério do conforto térmico e os requisitos estipulados para as diferentes regiões climáticas, assim como a definição de edifícios nZEB.

Tabela 5.1 - Pacote de medidas de melhoria passivas ao nível da envolvente [30]

Elemento construtivo	Paredes	Cobertura	Envidraçados
Tipologia Caraterística térmica	Isolamento térmico $\lambda = 0.037(\text{W/m/}^{\circ}\text{C})$	Isolamento térmico $\lambda = 0.04(\text{W/m/}^{\circ}\text{C})$	Vão envidraçado com vidro duplo $U(\text{W/m/}^{\circ}\text{C})$ Fator solar do vão envidraçado
	Espessura adicional para alcançar requisito mínimo para cada região climática	Espessura adicional para alcançar requisito mínimo para cada região climática	Solução necessária para alcançar o valor mínimo do coeficiente de transmissão térmica e fator solar máximo admissível do vão envidraçado para cada região climática

De acordo com a portaria n.º 349-D/2013 e n.º 17-A/2016 [45] o coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente exterior de um edifício deve ter um valor inferior aos valores indicados na tabela I.11 dessa portaria. Encontram-se na Tabela 5.2 os valores referência dos elementos da envolvente exterior para a zona climática de inverno I1, zona em que o edifício se insere.

Tabela 5.2 – Valores do coeficiente de transmissão térmica máximo admissível para a envolvente opaca e envidraçada exterior de edifícios de comércio e serviços para a região climática II ($W/m^2\text{°C}$), adaptado de [45].

Coeficiente de transmissão térmica máximo $U_m(W/m^2\text{°C})$	Zona Climática
Portugal Continental	A partir de 31 de dezembro de 2015
Zona climática	II
Elementos opacos verticais exteriores ou interiores	0,70
Elementos opacos horizontais exteriores ou interiores	0,50
Vãos envidraçados exteriores (portas e janelas) (U_w)	4,30

Neste caso optou-se por adotar o isolamento térmico XPS que são placas isolantes rígidas, que permitem obter um isolamento térmico contínuo na face exterior da fachada, sendo este tipo de ETICS o mais recomendado para edifícios com mais de 50 anos [55].

Apresenta uma condutibilidade térmica de $0,037 W/mK$, cumprindo os requisitos regulamentares. De modo a cumprir os valores definidos na portaria [45], ou seja, ter coeficiente de transmissão térmica máximo de $0,70 (W/m^2\text{°C})$ para as paredes exteriores e $0,50 (W/m^2\text{°C})$ para a cobertura exterior, a espessura deve ser alterada até se obter os valores correspondentes aos requisitos mínimos.

Os valores obtidos para cada uma das zonas da envolvente, cobertura, parede e laje de pavimento encontram-se discriminados de forma detalhada nas tabelas Tabela 5.3, Tabela 5.4 e Tabela 5.5 em que,

- ρ – Massa volúmica, (kg/m^3);
- k – Condutibilidade térmica, (W/mK);
- R_{th} – Resistência total térmica ($m^2\text{°C}/W$);
- R_{se} - Resistência térmica superficial exterior, ($m^2\text{°C}/W$);
- R_{si} - Resistência térmica superficial interior, ($m^2\text{°C}/W$);
- U - Coeficiente de transmissão térmica, ($W/m^2\text{°C}$).

Tabela 5.3 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas da parede exterior

Parede Exterior					
Camada	Designação	Espessura (mm)	ρ (kg/m^3)	k (W/mK)	R_{th} ($m^2\text{°C}/W$)
1	R_{se}	-	-	-	0,040
2	Reboco	20	2200	2	0,010
3	XPS	50	40	0,037	1,350
4	Tijolo 11cm	110	1200	0,5	0,220
5	Ar	50	1,225	-	0,180
6	Tijolo 15 cm	150	1200	0,5	0,300
7	Reboco	20	2200	2	0,010
8	R_{si}	-	-	-	0,013
Soma		400	-	-	2,123
U ($W/m^2\text{°C}$)		-	-	-	0,471

Tabela 5.4 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas da cobertura exterior

Cobertura exterior					
Camada	Designação	Espessura (mm)	ρ (kg/m ³)	k (W/mK)	Rth (m ² °C/W)
1	Rse	-	-	-	0,04
2	telha	70	1900	1,3	0,054
4	Ar	50	1,225	-	0,180
3	XPS	100	40	0,037	2,700
5	Laje maciça	100	2350	2,0	0,050
6	reboco	20	2200	2	0,010
7	Rsi	-	-	-	0,013
Soma		340	-	-	3,047
U (W/m²°C)					0,328

Tabela 5.5 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas da laje de pavimento

Laje de pavimento					
Camada	Designação	Espessura (mm)	ρ (kg/m ³)	k (W/mK)	Rth (m ² °C/W)
1	Rse	-	-	-	0,04
2	Isolamento I02	100	43	0,03	3,33
3	Betão maciço B15	203,2	2240	1,95	0,104
4	Rsi	-	-	-	0,100
Soma		303,2	-	-	3,574
U (W/m²°C)		-	-	-	0,279

Adotaram-se diferentes espessuras para o material de isolamento escolhido o XPS, de modo a cumprir os requisitos regulamentares, tendo o coeficiente de transmissão térmica da parede exterior baixado para 0,471 (W/(m²°C)), a laje de pavimento diminuiu para um valor de 0,279 (W/(m²°C)) e o da cobertura passou de um valor de coeficiente de transmissão térmica de 2,882 (W/(m²°C)) para 0,328 (W/(m²°C)), encontrando-se já dentro dos valores regulamentares.

5.1.2 Envolvente Não Opaca

Os vãos envidraçados possuem requisitos ao nível do fator solar e ao nível do coeficiente de transmissão térmica. No entanto, os vãos orientados no quadrante norte ficam dispensados das exigências relativas ao fator solar, conforme se representa na Figura 5.1.

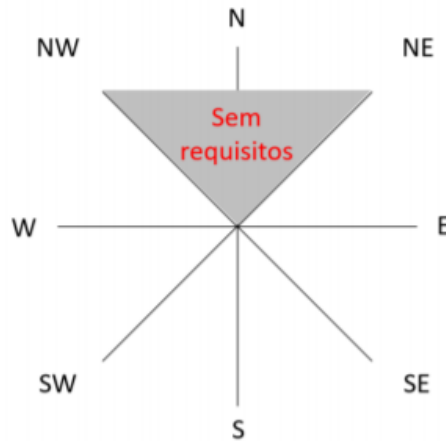


Figura 5.1 – Orientações com requisitos ao nível do fator solar dos envidraçados [56]

Deste modo geral, um vão envidraçado para ser regulamentar, deve verificar a desigualdade,

$$g_T \cdot F_o \cdot F_f \leq g_{T,m\acute{a}x} \quad (5.3)$$

em que,

g_T – Fator solar global do vão envidraçado com todos os dispositivos de proteção solar, permanentes ou móveis totalmente ativados;

F_o – Fator de sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes ao envidraçado, compreendendo palas e varandas (estação de arrefecimento);

F_f – Fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado, compreendendo pelas verticais, outros corpos ou partes do edifício (estação de arrefecimento).

O valor do $g_{T,m\acute{a}x}$ é o fator solar máximo dos vãos envidraçados definido na portaria n.º 349-D/2013 e n.º 17-A/2016 [45]. Este fator também depende da região climática, sendo que, neste caso, o valor máximo é de 0,56 pois o edifício está inserido na zona climática V2.

Uma das melhorias a efetuar no edifício, é a substituição dos vãos envidraçados, para passarem todos a possuir uma caixilharia metálica com corte térmico e um estore de laminas como proteção solar, que acarreta benefícios energéticos relevantes.

Para avaliar o impacto que as alterações nos envidraçados anteriormente sugeridas, têm no desempenho energético do edifício, utilizou-se o software *Berkeley Lab WINDOW*. Trata-se de um programa de computador de acesso livre que permite calcular os índices de desempenho térmico dos envidraçados. Este software foi elaborado tendo por base a norma ISO 15099, sendo que, para além desta, possui ainda uma série de outras funcionalidades que têm vindo a ser atualizadas em função das constantes alterações às normas e regulamentos. A documentação técnica e certificação do software pode ser encontrada no respetivo site [57]. O software *Berkeley Lab WINDOW* apresenta uma interface intuitiva e é de fácil utilização, permitindo criar e simular o envidraçado pretendido, pois dispõe de várias bibliotecas, possibilitando a análise de diferentes soluções.

Neste caso foram testadas várias soluções e simulado o desempenho térmico tendo-se optado pelas seguintes alternativas, que se encontra na Figura 5.2.

- Tipo de vidro – foi selecionado o modelo *PLANITHERM Max* (10 mm e 6 mm) da marca *Saint Gobain*, uma vez que a marca se encontra sediada na Europa e possui uma distribuidora em Portugal;
- Tipo de caixilharia - Navarra N1 4200, de uma empresa portuguesa.

	ID	Name	Mode	Thick	Flip	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tir	E1	E2	Cond	Comment
▼ Glass 1 ▶▶	21438	PLANITHERM XN 10mm.SGG	#	10.0	☐	0.603	0.231	0.217	0.885	0.049	0.059	0.000	0.050	0.840	1.000	
Gap 1 ▶▶	1	Air		6.0												
▼ Glass 2 ▶▶	21448	PLANITHERM HN 6mm.SGG		6.0	☐	0.563	0.227	0.178	0.764	0.049	0.079	0.000	0.145	0.840	1.000	

Figura 5.2 – Layout do software *Berkeley Lab WINDOW*

Assim, determinado o vidro duplo e a caixilharia de corte térmico a utilizar, os valores de U_{env} (coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados) e g_T (fator solar do vão envidraçado), passam a ser os seguintes:

Tabela 5.6-Propriedades do vão envidraçado propostos

	Envidraçado
Tipo de vidro	duplo
Tipo de caixilharia metálica	Com corte térmico
Espessura da lamina de ar	6 mm
U_{env}	3,0
g_T	0,485

Ao adotar esta solução ou outra equivalente com as mesmas propriedades térmicas, os envidraçados cumprem os requisitos da legislação nacional. Resumem-se na Tabela 5.7 as propriedades dos elementos construtivos da envolvente apresentando-se os dois cenários, com e sem melhoria da envolvente.

Tabela 5.7 - Propriedades dos elementos construtivos da envolvente

Elemento construtivo	Cenário inicial	Cenário com melhoria da envolvente
Parede exterior	U (W/m ² °C)=1,294	U (W/m ² °C)=0,471
Cobertura exterior	U (W/m ² °C) = 2,882	U (W/m ² °C) = 0,328
Laje de pavimento	U (W/m ² °C) = 4,098	U (W/m ² °C) = 0,279
Envidraçado	$U_{env} = 3,5$; $g_T = 0,75$	$U_{env} = 3,0$; $g_T = 0,485$

a) Simulação dos consumos energéticos com alteração da envolvente

Teoricamente, a mudança da constituição da envolvente para materiais com melhores características, permite uma alteração, de forma passiva, da eficiência energética do edifício. Assim, foi analisado o potencial das medidas para a melhoria do desempenho energético, nomeadamente a nível das necessidades de aquecimento, avaliando a redução do consumo de energia primária, bem como a viabilidade económica das medidas. 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.

A obtenção dos consumos energéticos foi efetuada com recurso ao software TRNSYS, encontrando-se na Tabela 5.8 os valores obtidos para as necessidades térmicas de aquecimento e a correspondente variação percentual.

Tabela 5.8-Necessidades térmicas de arrefecimento e aquecimento do edifício com melhoria da envolvente

	(kWh/ano)	Variação (%)
Necessidades térmicas de aquecimento	497126,4	-15,4%

Na Figura 5.3 encontra-se o gráfico obtido no TRNSYS para a temperatura do ar interior das diferentes zonas térmicas.

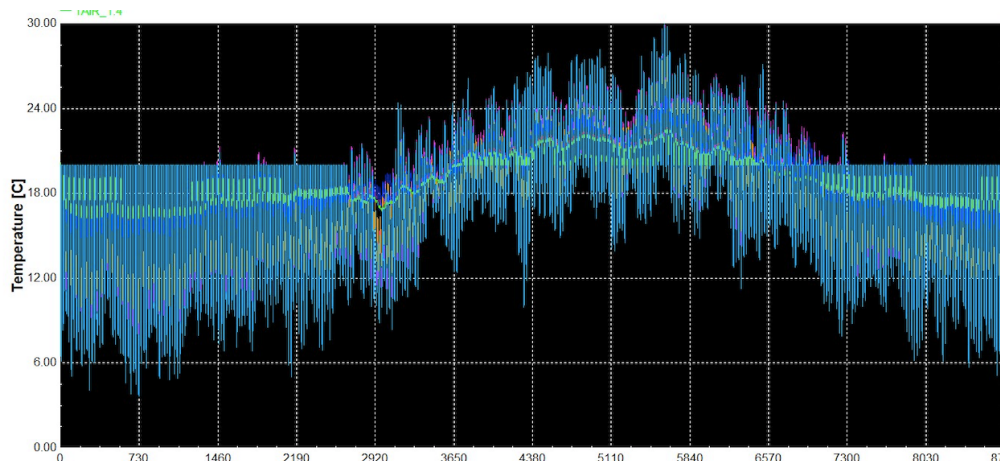


Figura 5.3 - Gráfico de temperaturas do ar interior para as diferentes zonas térmicas

No gráfico da Figura 5.4 a variação durante um ano das necessidades térmicas de aquecimento das diferentes zonas térmicas do edifício após se ter efetuado as alterações na envolvente.

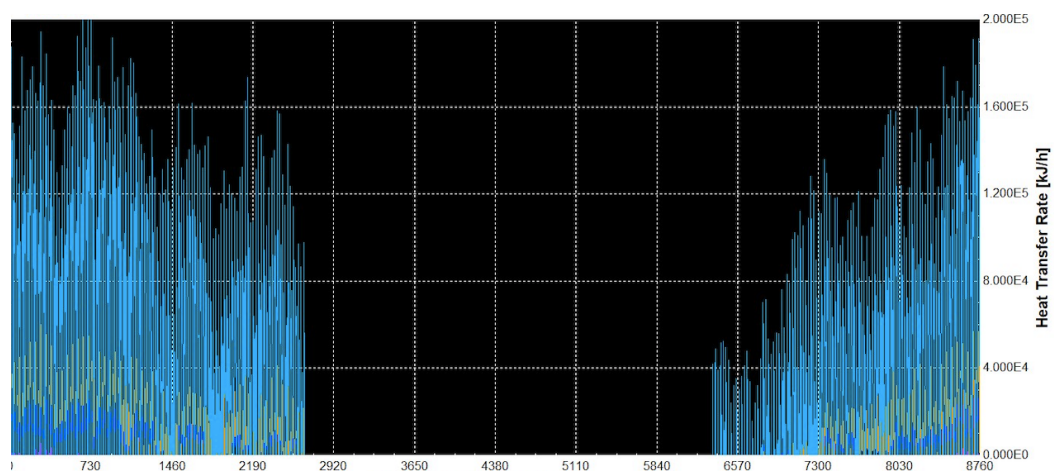


Figura 5.4 - Gráfico das necessidades térmicas de aquecimento das diferentes zonas térmicas

Com a aplicação da medida de melhoria ao nível da envolvente verifica-se que as necessidades térmicas de aquecimento tiveram uma diminuição de 15,38%, ou seja, a temperatura interior do edifício sofre menos variações mantendo-se mais próxima dos valores de conforto térmico, e o edifício melhora o seu desempenho térmico durante a estação de aquecimento. A colocação de isolamento térmico reduz as necessidades de aquecimento permitindo também corrigir algumas das patologias decorrentes de condensações, mas origina um aumento nas necessidades de arrefecimento. No entanto, como este edifício não tem qualquer equipamento destinado ao arrefecimento, a aplicação desta medida tem um efeito imediato na redução do consumo de gás natural, e obviamente nas despesas anuais com energia. Refira-se ainda que este edifício tem grandes necessidades de aquecimento quando comparadas com as de arrefecimento (ver Figura 4.17).

Com esta proposta de melhoria ao nível da envolvente, determinaram-se o gás necessário para aquecimento através da seguinte fórmula,

$$N_{comb} = \frac{N_{aq}}{\eta_{cald}} = \frac{497126,4}{0,85} = 584855 \text{ kwh/ano} \quad (5.4)$$

em que,

N_{comb} - Consumo de combustível em (kWh/ano);

N_{aq} - Necessidades térmicas de aquecimento em (kWh/ano);

η_{cald} - Rendimento da caldeira.

Na Tabela 5.9 apresentam-se os valores de consumo de gás para o edifício Pensionato original e o consumo estimado com a aplicação das melhorias ao nível da envolvente.

Tabela 5.9 - Consumo de gás natural com melhoria da envolvente

	Cenário inicial	Cenário com melhoria da envolvente
Fonte de Energia	Gás Natural	Gás Natural
Consumo energético anual	691221 kWh	584855 kWh
Custos energético unitário	0,1 €/kWh	0,1 €/kWh
Custos energéticos anuais	69.122,10 €	58.485,50 €

b) Viabilidade económica da medida de melhoria da envolvente

Nesta secção calcula-se o período de retorno simples do investimento resultante da implementação da medida de melhoria na envolvente pela colocação de isolamento XPS e correção do desempenho térmico dos vãos envidraçados. Para o efeito vão-se determinar os custos associados à aplicação desta medida, avaliando as reduções de consumo de energia.

Numa primeira fase vai-se determinar o valor do investimento, utilizando-se os custos padrão da portaria n.º 303/2019 [60]. Assim,

- Para a envolvente opaca,

$$\begin{aligned} C_{opaca} &= \text{Área de intervenção} \times \text{Custo padrão por m}^2 \\ &= 5216,30 \times 60 = 312.978\text{€}; \end{aligned}$$

- Para os vãos envidraçados,

$$\begin{aligned} C_{envidraçados} &= \text{Área de intervenção} \times \text{Custo padrão por m}^2 \\ &= 162,507 \times 300 = 48.752,10\text{€}. \end{aligned}$$

Resultando um custo do investimento de,

$$C_{investimento} = 312.978\text{€} + 48.752,10\text{€} = 361.730,10 \text{ €}$$

A aplicação desta medida só tem impacto no consumo de gás natural, havendo uma redução no consumo que se traduz numa poupança de 10.636,60 €/ano (poupança = 69.122,10€-58.485,50€), diminuindo em também 15,38% os atuais gastos com o gás natural.

O período de retorno do investimento é de,

$$PRS = \frac{C}{P} = \frac{361.730,10\text{€}}{10.636,60\text{€}} = 34,1 \text{ anos.}$$

Resumem-se na Tabela 5.10 as poupanças energéticas e de custos que a aplicação desta medida origina.

Tabela 5.10 - Poupanças energéticas e de custos da medida de melhoria da envolvente

	Resultados
Redução anual do consumo energia	106366 kWh
Redução anual dos custos de energia	10.636,60 €
Investimento estimado	361.730,10 €
Período de retorno	34,1 anos

Como se constata a aplicação desta melhoria obriga a um investimento inicial elevado com um período de retorno longo, só se justificando em conjunto com outras medidas, ou considerando os benefícios fiscais e contabilísticos (o benefício resultante da dedução fiscal destes depende do perfil fiscal do proprietário – taxa de IRC paga, havendo também que atender a valorização do imóvel - ativo), análise que está fora do âmbito deste trabalho, ou eventualmente se existir financiamento a fundo perdido do investimento.

5.2 Instalação de sistema de iluminação mais eficiente

Neste edifício o sistema de iluminação é um dos fatores que mais contribui para um elevado consumo energético de eletricidade, sendo também um dos mais fáceis de melhorar. A sua operacionalização é simples e de custos reduzidos, consistindo na substituição de lâmpadas, tendo um retorno relativamente rápido.

Como foi mencionado previamente, a iluminação do edifício é realizada por intermédio de lâmpadas fluorescentes lineares, mas devido à dimensão e número de lâmpadas no edifício os consumos energéticos associados aos equipamentos de iluminação são elevados quando comparados com outras alternativas disponíveis no mercado.

Uma medida que deve ser considerada no imediato passa pela substituição de todas as lâmpadas por lâmpadas do tipo LED (*Light Emitting Diode*). Este tipo de lâmpadas permite uma redução significativa no consumo de eletricidade do edifício na ordem dos 70%, sendo a opção energeticamente mais eficiente [58]. Adicionalmente, um dos aspetos onde se sente uma maior diferença entre as lâmpadas LED e as lâmpadas fluorescentes utilizadas atualmente é ao nível da durabilidade. A duração de uma lâmpada LED acaba por ser mais de duas vezes superior, apresenta um tempo de vida entre 15 a 25 anos enquanto as lâmpadas fluorescentes têm uma durabilidade de 6 a 10 anos. Devido à sua longa vida útil, são evitadas substituições regulares, como habitualmente acontece com outras lâmpadas, são recicláveis e não emitem gases responsáveis pelo efeito de estufa [58]. Foi sugerido a utilização de um só tipo de lâmpada nos diferentes espaços, pois seria mais prático em termos de manutenção / compras. Assim

sendo, a substituição analisada consistiu na substituição das atuais 252 lâmpadas por lâmpadas do tipo LED *Philips CorePro LEDtube* 1200mm 14,5W.

a) Simulação dos consumos energéticos da medida de melhoria do sistema de iluminação

A aplicação desta medida foi simulada tendo-se observado uma alteração face à situação anterior, no que se refere aos valores do consumo de energia, conforme se apresenta na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Consumos energéticos da medida de melhoria do sistema de iluminação

	Edifício original	LED's	Variação
Energia por área Climatizada (MWh/m ² ano)	395,4	369,5	-6,5%
Energia por área total (MWh/m ² ano)	306,4	286,3	-6,5%
Energia Final (MWh/m ² ano)	819,8	766,1	-6,5%

Como era de esperar, resultou uma diminuição na energia total utilizada, devido à substituição das lâmpadas por lâmpadas LED em todo edifício. No entanto, esta substituição influencia o comportamento térmico do edifício, pois quase toda a energia fornecida às lâmpadas LED é convertida em iluminação pelo que praticamente não há libertação de calor, e consequentemente há um aumento das cargas térmicas de aquecimento, conforme se pode comprovar com os valores determinados que se encontram na Tabela 5.12.

Tabela 5.12-Necessidades térmicas de aquecimento resultantes da medida de melhoria do sistema de iluminação

	Edifício atual	LED	Variação
Necessidades térmicas de aquecimento (MWh/m ² ano)	587,5	606,9	3,3%

Atualmente, cada vez mais se faz uso dos chamados sistemas de ajuste de luminosidade, designados por *dimming systems*, permitindo assim que se ajuste a luminosidade em função da ocupação, do horário de funcionamento, da quantidade de luz natural, entre outros. O uso de uma solução de ajuste automático associada à substituição das lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED, seria uma mudança com impacto mais significativo no desempenho energético do edifício. No entanto esta medida não foi avaliada pois seria necessário ter uma ideia real de ocupação dos espaços e como já referido, devido à pandemia Covid-19 e o tipo de utilização do edifício, as visitas ao edifício foram diminutas.

Resumem-se na Tabela 5.13 os consumos de energia útil anuais em kWh, para aquecimento e iluminação, correspondentes à situação atual do edifício. Apenas se apresentam os consumos de energia referentes a estes dois tipos de utilização, uma vez que as alterações nos consumos só ocorrem para estes.

Tabela 5.13 - Consumos anuais do edifício Pensionato com a medida de melhoria do sistema de iluminação

		Cenário inicial	Cenário com melhoria do sistema de iluminação
Aquecimento	Fonte de Energia	Gás natural	Gás natural
	Consumo energético anual	691221 kWh	714016 kWh
	Custos energético unitário	0,1 €/kWh	0,1 €/kWh
	Custos energéticos anuais	69.122,10 €	71.401,60 €
Iluminação	Fonte de Energia	Eletricidade	Eletricidade
	Consumo energético anual	46994 kWh	17040 kWh
	Custos energético unitário	0,2 €/kWh	0,2 €/kWh
	Custos energéticos anuais	9.398,80 €	3.408 €

Na Figura 5.5 encontra-se o gráfico obtido no TRNSYS para a temperatura do ar interior das diferentes zonas térmicas.

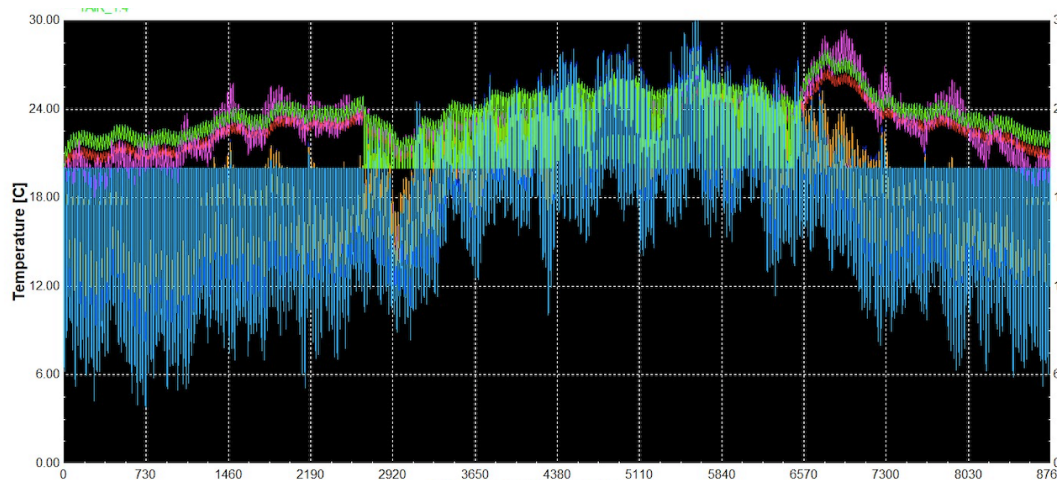


Figura 5.5 - Gráfico de temperaturas do ar interior para as diferentes zonas térmicas

No gráfico da Figura 5.6 a variação durante um ano das necessidades térmicas de aquecimento das diferentes zonas térmicas do edifício após se ter efetuado as alterações da iluminação.

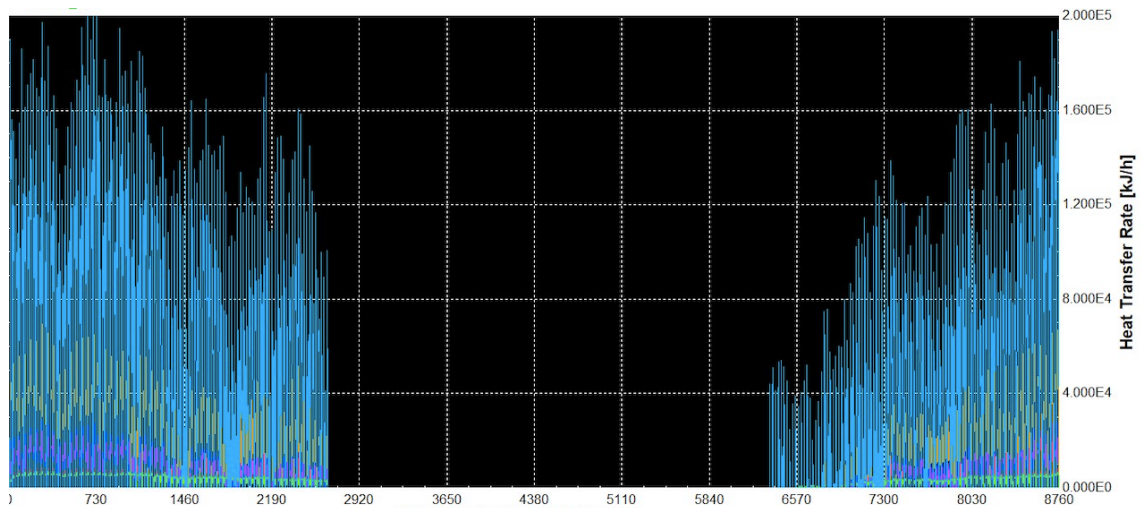


Figura 5.6 - Gráfico das necessidades térmicas de aquecimento das diferentes zonas térmicas

b) Viabilidade económica da medida de melhoria do sistema de iluminação

Os custos de investimento com esta medida consistem na substituição das 252 lâmpadas do edifício por lâmpadas do tipo LED *Philips CorePro LEDtube* 1200mm 14,5W 840, sendo o custo de cada uma de 14,15 € [60], tendo-se obtido o seguinte,

$$C_{\text{investimento}} = 252 \times 14,15\text{€} = 3.565,80\text{€};$$

sendo a poupança de,

$$P = (9.398,80\text{€} - 3.408\text{€}) + (69.122,10 - 71.401,60) = 3.711,30 \text{ €};$$

o período de retorno deste investimento é dado por,

$$PSR = \frac{3.565,80\text{€}}{3.711,30\text{€}} = 0,96 \text{ anos} \approx 1 \text{ ano}.$$

Resumem-se na Tabela 5.14 as poupanças energéticas e de custos resultantes da aplicação da medida.

Tabela 5.14 - Poupanças energéticas e de custos da medida de melhoria do sistema de iluminação

	Resultados
Redução anual do consumo energia	29954 kWh
Redução anual dos custos de energia	3.711,80 €
Investimento estimado	3.565,80 €
Período de retorno	$\approx 1 \text{ ano}$

5.3 Melhoria da eficiência dos sistemas técnicos

Após a apresentação de medidas de melhoria da envolvente e da substituição das lâmpadas por outras mais eficientes, apresenta-se a avaliação resultante da proposta de intervenção nos sistemas técnicos, melhorando a sua eficiência e reduzindo as perdas de energia associadas a estes. Atualmente o edifício tem em funcionamento um sistema de aquecimento central, que é constituído por uma caldeira de potência de 35 kW, com 15 anos e uma outra caldeira com as mesmas características que se encontra afeta ao sistema águas quentes sanitárias. A caldeira destinada ao aquecimento é desligada na estação de arrefecimento apenas ficando em funcionamento a destinada à preparação de AQS.

O edifício não tem instalado qualquer sistema técnico de arrefecimento. No entanto, de modo a contribuir para uma melhoria do conforto térmico será equacionada a proposta de instalação de um sistema deste tipo. A reformulação do sistema de climatização pode ser equacionada de diversas formas, uma vez que existem bastantes aspetos que influenciam o seu funcionamento e desempenho, para além de várias alternativas no mercado.

Nesta secção irão analisar-se medidas de melhoria de eficiência dos sistemas técnicos que consistem na substituição das caldeiras do sistema de aquecimento e da caldeira da preparação de águas quentes sanitárias por equipamentos mais eficientes, sendo estudadas diferentes alternativas, designadamente outros tipos de equipamentos. Analisar-se-á um conjunto de alternativas que, diretamente ou indiretamente, irão melhorar não só o aproveitamento energético do edifício como também reduzir os custos incorridos na utilização e manutenção dos equipamentos em causa. Posteriormente, será avaliada a proposta de instalação de sistema de climatização de arrefecimento. Todas estas propostas de melhoria são avaliadas em termos de consumos efetuadas no edifício original sem qualquer tipo intervenção ao nível da envolvente.

Para análise do impacto da substituição dos atuais sistemas técnicos recorreu-se aos simuladores desenvolvidos pela ADENE no âmbito do “Programa de Eficiência Energética na Administração Pública, ECO.AP” [74] que permitem determinar o resultado indicativo da implementação de medidas de melhoria da eficiência energética em edifícios. Estes simuladores utilizam complexos algoritmos de cálculo que permitem aos utilizadores, determinar, de forma relativamente rápida e intuitiva, o resultado indicativo, mas aproximado, da implementação de medidas de melhoria da eficiência energética em edifícios, seja ao nível da remodelação dos sistemas de iluminação, da substituição dos equipamentos de climatização e/ou de produção de águas quentes sanitárias, bem como para um melhor aproveitamento da energia solar térmica ou da instalação de centrais solares fotovoltaicas [63].

5.3.1 Substituição das caldeiras por caldeiras de condensação a gás natural

A caldeira é um equipamento térmico em que os gases provenientes da queima de um combustível cedem energia térmica a um fluido que é aquecido. Por outras palavras, é de um modo geral um permutador de calor no seio do qual existe uma fornalha onde se dá uma reação de combustão, seguida de uma região dedicada exclusivamente à transferência térmica. Em muitas circunstâncias, o calor é transferido dos gases de combustão para o fluido a aquecer ainda na região da fornalha, sendo que neste caso as paredes desta atuam como permutador de calor [64]. É constituída por diversos equipamentos integrados, para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível, e garantindo a segurança de funcionamento.

Nesta secção irá estudar-se a substituição da caldeira existente por uma caldeira nova de condensação com as mesmas características e utilizando o mesmo combustível.

As caldeiras de condensação, são caldeiras que produzem água quente, mas ao contrário das caldeiras convencionais que libertam os gases de combustão livremente para a atmosfera, as caldeiras de condensação permitem a utilização da energia contida nestes gases, o que se

traduz num maior rendimento energético do equipamento, visto que aproveitam quase integralmente o poder calorífico do combustível utilizado. As caldeiras de condensação alcançam eficiências superiores, reduzindo assim os custos com o aquecimento e com as emissões de gases poluentes. O uso de caldeiras de condensação, quando comparado com as convencionais, apresenta muitas vantagens do ponto de vista energético, económico e ambiental. Numa caldeira de condensação a gás, a água é aquecida através do calor da combustão, tal como nas caldeiras convencionais. No entanto, nas caldeiras convencionais, os gases de combustão resultantes, são expelidos pela chaminé e dessa forma, a energia contida nesses gases é desperdiçada. Nas caldeiras com a tecnologia de condensação, o calor dos gases de combustão é extraído e colocado no circuito de aquecimento. A caldeira de condensação arrefece o vapor num permutador de calor especialmente concebido para o efeito. A energia assim obtida é usada para pré-aquecer a água do aquecimento, sendo que, a água, já quente, passa no primário do permutador de calor onde é aquecida até à temperatura final desejada. Durante este processo, pequenas quantidades de água proveniente da condensação são eliminadas [62].



Figura 5.7 - Caldeiras convencionais versus caldeiras de condensação [62]

a) Simulação dos consumos energéticos

Para uma melhor perceção dos custos envolvidos e poupanças energéticas associados à instalação de novas caldeiras fez-se o estudo em separado. As estimativas dos consumos e custos foram efetuadas nos simuladores da ECO.AP [Anexo E cenário 1 e 2]. Assim, na Tabela 5.15, encontram-se os custos e os consumos energéticos associados à substituição da caldeira afeta ao aquecimento.

Tabela 5.15 - Custos e consumos energéticos da caldeira de condensação a gás natural para aquecimento

	Cenário inicial	Cenário com substituição da caldeira de aquecimento
Equipamento	Caldeira	Caldeira de condensação
Potência nominal	35 kW	35 kW
Rendimento	85%	110%
Fonte de energia	Gás natural	Gás natural
Consumo energético anual	691221 kWh	534125 kWh
Custos energético unitário	0,1 €/kWh	0,1 €/kWh
Custos energéticos anuais	69.122,10 €	53.412,50 €

No que diz respeito à preparação de AQS apresentam-se na Tabela 5.16 os custos e consumos energéticos para o mesmo tipo de caldeira.

Tabela 5.16 - Custos e consumos energéticos da caldeira de condensação a gás natural para AQS

	Cenário inicial	Cenário com substituição da caldeira de AQS
Equipamento	Caldeira	Caldeira de condensação
Combustível	Gás natural	Gás natural
Rendimento	85%	110%
Consumo energético anual	92459 kWh	71340 kWh
Custos anuais	9.245,90 €	7.134 €

b) Viabilidade económica da medida de melhoria

Com a aplicação da substituição das caldeiras atuais por caldeira de condensação, no que diz respeito ao aquecimento, apresentam-se na Tabela 5.17 os dados necessários ao cálculo do período de retorno (PRS), ou seja, os custos de investimento e a poupança. Dada a variedade de marcas e modelos optou-se por utilizar os valores indicativos sugeridos pelos simuladores da ECO.AP [Anexo E cenário 1 e 2].

Tabela 5.17- Período de retorno da substituição da caldeira de aquecimento

Substituição da caldeira de aquecimento	Resultados
Redução anual do consumo energia	157096 kWh
Poupança	15.709,60 €
Investimento estimado	53.520 €
Período de retorno (PRS)	3,4 anos

No que diz respeito à substituição da caldeira para preparação das águas quentes sanitárias apresentam-se os custos envolvidos e as poupanças na Tabela 5.18, conforme resulta dos valores apresentados do anexo E (cenário 2).

Tabela 5.18- Período de retorno da substituição da caldeira de AQS

Substituição da caldeira de AQS	Resultados
Redução anual do consumo energia	21119 kWh
Poupança	2.111,90 €
Investimento estimado	29.422 €
Período de retorno (PRS)	13,9 anos

5.3.2 Substituição das caldeiras por caldeiras a biomassa

As caldeiras a biomassa usam como fonte de energia combustível madeira, pellets, briquetes ou resíduos florestais e, por isso, são consideradas as mais ecológicas do mercado. Embora o princípio de funcionamento destas caldeiras seja similar ao de uma caldeira convencional, queimam biomassa. As principais vantagens são o facto de a fonte de energia ser uma fonte renovável e o preço do combustível ser um dos mais baixos do mercado. Nesta secção analisa-se a substituição da caldeira existente por uma caldeira nova a biomassa com as mesmas características, avaliando-se os custos e poupanças energéticas associadas a esta substituição bem como o período de retorno do investimento.

a) Simulação dos consumos energéticos

Apresentam-se na Tabela 5.19 os dados obtidos com a já referida calculadora da ECO.AP (Anexo E cenário 3 e 4), para a substituição da atual caldeira por uma caldeira a biomassa com a mesma potência nominal. Relativamente aos custos de energia e como já referido anteriormente usou-se o valor indicativo dos simuladores da ECO.AP no âmbito do “Programa de Eficiência Energética na administração pública” ([74]).

Tabela 5.19- Custos e consumos energéticos da caldeira de biomassa para aquecimento

	Cenário inicial	Cenário com substituição da caldeira de aquecimento
Equipamento	Caldeira	Caldeira a biomassa
Potência nominal	35 kW	35 kW
Rendimento	85%	90%
Fonte de energia	Gás natural	Biomassa
Consumo energético anual	691221 kWh	652820 kWh
Custos energético unitário	0,1 €/kWh	0,04 €/kWh
Custos energéticos anuais	69.122,10 €	26.112,80 €

A substituição da caldeira a gás por uma caldeira a biomassa influencia mais os custos do consumo de energia que lhe estão associados, do que o consumo energético anual, pois, como se referiu, o combustível associado é significativamente mais barato.

No que diz respeito à caldeira para preparação das águas sanitárias resumem-se na Tabela 5.20 os valores obtidos.

Tabela 5.20- Custos e consumos energéticos da caldeira de biomassa para AQS

	Cenário inicial	Cenário com substituição da caldeira de AQS
Equipamento	Caldeira	Caldeira a biomassa
Combustível	Gás natural	Biomassa
Rendimento	85%	90%
Consumo Energético anual	92459 kWh	87193 kWh
Custos anuais	9.245,90 €	3.734 €

b) Viabilidade económica da medida de melhoria

Os períodos de retorno associados à aplicação da medida de melhoria da substituição das caldeiras atuais, por caldeiras a biomassa, encontram-se determinados na Tabela 5.21. Tal como na secção anterior optou-se por utilizar como valor de referência para o investimento da substituição da caldeira os valores indicativos do simulador da ECO.AP (Anexo E cenário 3 e 4).

Tabela 5.21- Período de retorno da substituição da caldeira de aquecimento

Substituição da caldeira de aquecimento	Resultados
Redução anual do consumo energia	38401 kWh
Redução anual dos custos de energia	43.009,30 €
Investimento estimado	53.520 €
Período de Retorno	1,3 anos

Com esta medida, em termos de consumo energético para aquecimento, apenas ocorreu uma redução de 5,55%, até porque haverá que ter em atenção que a caldeira atual é antiga. No entanto, e em termos de custos associados aos gastos com aquecimento, tal medida de substituição da caldeira, origina uma redução de custos de cerca de 62%, o que é bastante significativo.

Apresentam-se na Tabela 5.22 os valores associados à caldeira destinada às AQS.

Tabela 5.22- Período de retorno da substituição da caldeira de aquecimento

Substituição da caldeira de AQS	Resultados
Redução anual do consumo energia	5266 kWh
Redução anual dos custos de energia	5.758 €
Investimento estimado	39.722 €
Período de Retorno	6,8 anos

5.3.3 Substituição das caldeiras por bombas de calor

Uma bomba de calor é um equipamento que extrai o calor do meio envolvente transferindo-o para um sistema hidráulico que se encarrega do aquecimento e do arrefecimento. As bombas de calor são projetadas para mover a energia térmica na direção oposta do fluxo de

calor espontâneo, transferindo calor de uma temperatura baixa para um meio de temperatura mais alta. A potência externa usada pela bomba de calor é necessária para realizar o trabalho de transferir energia do meio frio para o meio quente e não para gerar diretamente aquecimento ou arrefecimento. As bombas de calor são constituídas por um compressor, um condensador, uma válvula de expansão, um evaporador e um líquido refrigerante.

A transferência de calor, sem a necessidade de dispositivos externos, ocorre das altas temperaturas para as baixas temperaturas, pelo que, para que ocorra a transferência de calor de uma temperatura mais baixa para uma temperatura mais elevada, é necessário a utilização de dispositivos especiais que operam num ciclo termodinâmico, designado por refrigeração.

O funcionamento das bombas de calor consiste num ciclo composto por quatro etapas: evaporação, compressão, condensação e expansão.

Na primeira etapa, o fluido refrigerante absorve a energia térmica do ambiente, graças à baixa temperatura do fluido na bomba de calor. Ao fazê-lo, muda para a fase gasosa por causa da baixa temperatura de evaporação do fluido. O fluido resultante é comprimido no compressor até a pressão do condensador. O gás deixa o compressor a uma temperatura relativamente alta e quando chega ao condensador este arrefece e é condensado à medida que passa pelas bobinas do condensador. O gás quente transmite a sua energia/calor para o sistema de aquecimento e o fluido refrigerante condensa, passando à fase líquida novamente. Finalmente, o refrigerante entra numa válvula de expansão onde a pressão e temperatura diminuem drasticamente devido ao efeito de estrangulamento. O refrigerante de baixa temperatura entra no evaporador, onde é evaporado, absorvendo o calor do espaço refrigerado. O ciclo é concluído quando o refrigerante sai do evaporador e entra novamente no compressor.

O indicador da eficiência de uma bomba de calor é o coeficiente de desempenho, COP, que é o rácio entre energia fornecida e a energia usada [65]. Na Figura 5.8 exemplifica-se de forma sintética o processo de funcionamento de uma bomba de calor.

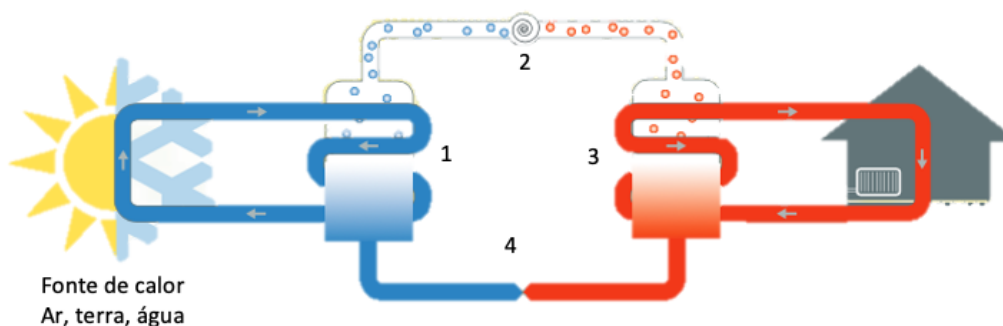


Figura 5.8 Processo de funcionamento de uma bomba de calor [65]

As bombas de calor são uma das soluções existentes no mercado mais eficientes e económicas, pois utilizam a energia do ar, um recurso que é gratuito e se encontra sempre disponível, permitindo reduzir as faturas de energia, ao mesmo tempo que contribuem para a sustentabilidade ambiental.

a) Simulação dos consumos energéticos

Nesta secção procede-se à análise de substituição das caldeiras existente por uma bomba de calor com a mesma potência nominal e um COP de 3,6, pois o valor mínimo de para um equipamento de classe A de acordo com a portaria n.º 349-D/2013 e n.º 17-A/2016 [45]. Apresentam-se nas tabelas 5.23 e 5.24 os consumos e custos energéticos desta medida de

melhoria para a substituição da caldeira de aquecimento e da caldeira de AQS [Anexo E cenário 5 e 6].

Tabela 5.23- Custos e consumos energéticos da bomba de calor para aquecimento

	Cenário inicial	Cenário com substituição da caldeira de aquecimento
Equipamento	Caldeira	Bomba de calor
Potência Nominal	35 kW	35 kW
Rendimento	85%	360%
Fonte de energia	Gás Natural	Energia Elétrica
Consumo energético anual	691221 kWh	163205 kWh
Custos energético unitário	0,1 €/kWh	0,2 €/kWh
Custos energéticos anuais	69.122,10 €	32.641 €

Tabela 5.24- Custos e consumos energéticos da bomba de calor para AQS

	Cenário inicial	Cenário com substituição da caldeira de AQS
Equipamento	Caldeira	Bomba de calor
Combustível	Gás Natural	Energia Elétrica
Rendimento	85%	360%
Consumo Energético anual	92459 kWh	21798 kWh
Custos anuais	9.245,90 €	4.359,60€

b) Viabilidade económica da medida de melhoria

Os períodos de retorno da aplicação da melhoria da substituição das caldeiras atuais por bombas de calor encontram-se na Tabela 5.25 e Tabela 5.26. Os valores de investimento utilizados foram os valores indicativos do simulador da ECO.AP constantes nos Anexos E cenário 5 e 6, dada a variedade de modelos e marcas existentes no mercado.

Tabela 5.25- Período de retorno da substituição da caldeira de aquecimento

Substituição da caldeira de aquecimento	Resultados
Redução anual do consumo energia	528016 kWh
Redução anual dos custos de energia	36.481,10 €
Investimento estimado	40.140 €
Período de Retorno	1,1 anos

Tabela 5.26- Período de retorno da substituição da caldeira de AQS

Substituição da caldeira de aquecimento	Resultados
Redução anual do consumo energia	70661 kWh
Redução anual dos custos de energia	4.886,30 €
Investimento estimado	33.836 €
Período de Retorno	6,9 anos

Esta é provavelmente a solução mais eficiente tanto em termos de redução de energia utilizada, que baixou 76,4%, quer em termos de custos associados que também reduziram significativamente (cerca de 52,6%).

5.3.4 Análise comparativa das diferentes propostas de equipamentos técnicos

Como foram apresentados diferentes equipamentos técnicos para aquecimento e preparação de águas sanitárias efetuou-se uma análise comparativa da sua eficiência em termos energéticos. Apresenta-se no gráfico da Figura 5.9 as estimativas de consumos energéticos dos diferentes equipamentos técnicos destinados a aquecimento representados na figura pelas barras a azul e produção de AQS representadas pelas barras laranjas, comparativamente com as atuais caldeiras em funcionamento.

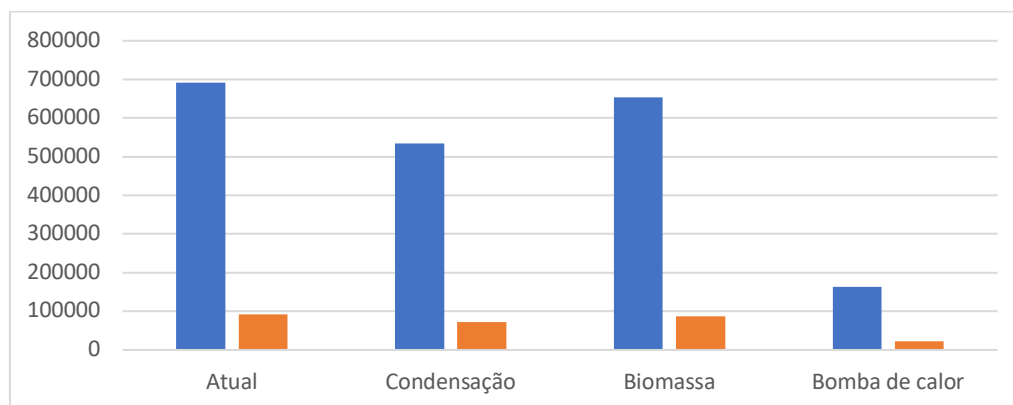


Figura 5.9 - Comparação dos consumos energéticos dos equipamentos técnicos para aquecimento e AQS

Conforme se pode observar, as maiores reduções ocorrem com a substituição das atuais caldeiras por bombas de calor, sendo uma solução mais eficiente quando comparada com as outras opções.

Conforme se pode observar a bomba de calor é o equipamento com melhor desempenho energético, permitindo reduzir em cerca de 73% os consumos de energia com aquecimento e AQS. No entanto, analisando a redução dos custos energéticos é a caldeira a biomassa que origina maior redução destes. Refira-se ainda que esta medida de substituição dos equipamentos técnicos mais eficientes para aquecimento e preparação das águas quentes sanitárias deve ser acompanhada com o reforço do isolamento das tubagens do sistema.

5.4 Implementação de sistemas com recurso a fontes de energia renovável

Nesta análise também serão propostas medidas de melhoria para a instalação de sistemas com recurso a fontes de energia renovável, principalmente para autoconsumo, reduzindo a utilização de energia proveniente da rede, emissões de CO₂ e os custos energéticos. Por outro lado, de acordo com o RECS e com os requisitos definidos na portaria [45], é referido que “Independentemente do tipo de sistema a instalar para preparação de AQS, este deve incluir obrigatoriamente soluções para aproveitamento de energia solar térmica, sempre que exista área de cobertura disponível...”.

5.4.1 Sistema solar térmico

Nestes termos foi verificado que a área da cobertura disponível é compatível com as necessidades de implantação de um sistema de painéis solares para aquecimento AQS. Será analisada a instalação de um sistema solar térmico para apoio à preparação de AQS. Efetuou-se a simulação com a calculadora da ECO.AP [Anexo E cenário 7], tendo-se obtido um sistema solar térmico constituído por 38 coletores solares perfazendo uma área de 85,5m², instalado na cobertura com azimuth sul e inclinação de 36°C [Anexo E cenário 7].

a) Simulação dos consumos energéticos

Apresenta-se na Tabela 5.27 a energia produzida pelo sistema solar térmico, bem como os consumos de energia associados [Anexo E cenário 7].

Tabela 5.27 - Energia produzida e consumos do sistema solar térmico

Consumos AQS energéticos anuais	92459 kWh
Energia produzida pelo solar térmico	54136 kWh
Consumo de energia (sistema de apoio)	45146 kWh
Excedente de energia (no verão)	16%
Contribuição do solar térmico	59%

b) Viabilidade económica da medida

O período de retorno da aplicação da melhoria de implementação de um sistema solar térmico para apoio à produção de AQS, encontra-se calculado na Tabela 5.28. O valor utilizado para o investimento no sistema solar térmico foi o valor indicativo resultante do simulador da ECO.AP [Anexo E cenário 7].

Tabela 5.28 - Período de retorno do sistema solar térmico

	Resultados
Custos energéticos com solar térmico	4.515€
Redução anual dos custos de energia	4.730 €
Investimento estimado	40.680 €
Período de retorno	8,6 anos

5.5.2 Sistema Fotovoltaicos

Mesmo após a instalação de um sistema solar térmico, ainda existe área na cobertura disponível para instalação de um sistema fotovoltaico. Esta solução tem sido cada vez mais procurada dado os gastos com os consumos de eletricidade pelos equipamentos do edifício, como a iluminação e equipamento elétrico em cada quarto. Em princípio, a instalação do sistema fotovoltaico será vantajosa dado o preço atual da eletricidade e a elevada disponibilidade de radiação solar na zona climática em que se insere o edifício. As calculadoras da ECO.AP têm como objetivo, “permitir utilizadores, determinar, de forma relativamente rápida e intuitiva, o resultado indicativo, mas aproximado, da implementação de medidas de melhoria da eficiência energética em edifícios, seja ao nível da substituição dos equipamentos de climatização e/ou de produção de águas quentes sanitárias, bem como para um melhor aproveitamento da energia solar térmica ou da instalação de centrais solares fotovoltaicas” [78]. Efetuou-se a simulação com a calculadora da ECO.AP [Anexo E cenário 8] tendo-se concluído que a solução passa pela instalação de 253 painéis ocupando uma área de cerca de 538m², com uma potência de 70 kW. E como se pode analisar dos resultados obtidos com a simulação, 44% da produção do sistema é absorvida pelo edifício.

a) Simulação dos consumos energéticos

Na Tabela 5.29 encontram-se os consumos energéticos iniciais do edifício e a produção de energia pelo conjunto de painéis fotovoltaicos.

Tabela 5.29 - Energia produzida e consumos do sistema de painéis fotovoltaicos

Consumos energéticos de eletricidade	189131 kWh
Energia transformada pelo painel fotovoltaico	102362 kWh
Autoconsumo	82724 kWh
Energia excedentária	19%
Consumo de energia renovável	44%

b) Viabilidade económica da medida

O período de retorno, da aplicação da instalação de um sistema fotovoltaico encontra-se calculado na Tabela 5.30. Tal como referido anteriormente, o valor utilizado para o investimento nos painéis fotovoltaicos foi o valor indicativo resultante do simulador da ECO.AP [Anexo E cenário 8].

Tabela 5.30 - Período de retorno da instalação de sistema de painéis fotovoltaicos

	Resultados
Custos energéticos anuais	3.782,60 €
Receita anual com fotovoltaico	17.413 €
Investimento	69.634 €
Período de Retorno	4 anos

5.5 Instalação de equipamentos de arrefecimento

Apesar do edifício atualmente não possuir qualquer tipo de equipamento destinado ao arrefecimento, a fim de contribuir para uma melhoria do seu conforto térmico foi equacionada a proposta de instalação de um equipamento destinado a este fim.

Assim, nesta secção analisa-se a proposta de instalação de equipamentos do tipo *chiller* que são equipamentos que produzem frio, a partir da energia térmica e apresentam como vantagem o seu baixo consumo energético. Funcionam com base num ciclo frigorífico e servem geralmente os espaços climatizados integrados num sistema centralizado, existindo posteriormente um sistema de distribuição do ar refrigerado. Este ciclo frigorífico está assente em princípios da termodinâmica, ocorrendo a transferência de energia térmica de um meio para outro.

Na Figura 5.10 encontra-se esquematizado o modo de funcionamento de um *chiller* bem como os seus componentes.

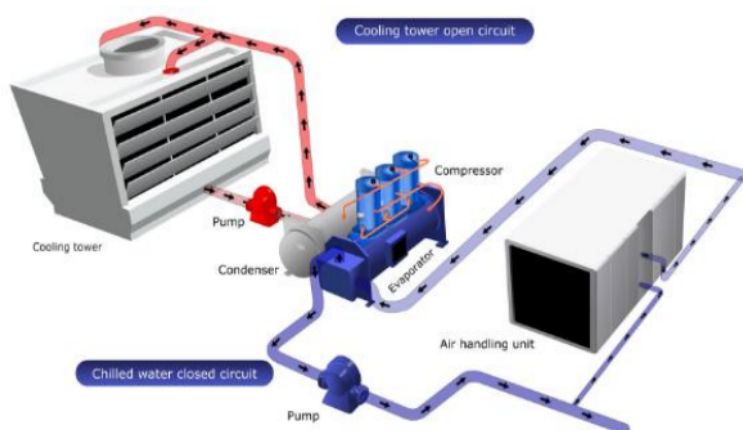


Figura 5.10 - Funcionamento de um *chiller* de climatização [66]

O processo de refrigeração começa no compressor aumentando a pressão que vai fazer o líquido refrigerante fluir até à válvula de expansão e desta até ao evaporador, passando o líquido refrigerante à forma gasificada. O gás refrigerante, a uma temperatura e pressão mais baixa, sai do evaporador e passa para o compressor donde sai a uma temperatura mais elevada e a alta pressão, é conduzido ao condensador onde é arrefecido até condensar. No final deste processo a água de condensação é conduzida até à torre de arrefecimento.

a) Simulação dos consumos energéticos

Os consumos energéticos associados a diferentes soluções para o equipamento de arrefecimento encontram-se na Tabela 5.31, tendo sido definidos com o simulador do ECO.AP [74], após terem sido determinadas as necessidades de arrefecimento do edifício com recurso ao TRNSYS.

Tabela 5.31 - Consumos energéticos anuais de diferentes equipamentos de arrefecimento

	Cenário com instalação de equipamento de arrefecimento	
Equipamento	<i>Chiller</i> (condensação a ar)	<i>Chiller</i> (condensação a água)
Combustível	Energia elétrica	Energia elétrica
Rendimento	375%	400%

b) Viabilidade económica da medida

Esta medida corresponde apenas a um investimento, pois o edifício não possui qualquer tipo de equipamento para arrefecimento, apresentando-se Tabela 5.32 os custos estimados para cada um dos equipamentos de acordo com os valores indicativos da ECO.AP [74].

Tabela 5.32 - Custos dos diferentes equipamentos de arrefecimento

	Cenário com instalação de equipamento de arrefecimento	
Equipamento	<i>Chiller</i> (condensação a ar)	<i>Chiller</i> (condensação a água)
Investimento	40.140 €	40.140 €
Custos anuais com energia	4.598 €	4.311 €

5.6 Impacto das medidas de melhoria

5.6.1 Comparação das medidas

Nas secções anteriores avaliaram-se cada uma das diferentes medidas de melhoria da eficiência energética do edifício em termos de consumo de energia e custos de investimento. As diferentes medidas estudadas foram ao nível da envolvente, da eficiência dos sistemas técnicos e da implementação de sistemas com recurso a fontes de energia renovável.

Elencam-se a seguir as diferentes medidas de melhoria equacionadas, que posteriormente serão identificadas pela seguinte designação:

- MM1 - a melhoria ao nível da envolvente opaca do edifício descrita em 5.1;
- MM2 - substituição do sistema de iluminação existente por um mais eficiente apresentado em 5.2;
- MM3 - melhoria da eficiência dos sistemas técnicos, com substituição das atuais caldeiras destinadas a aquecimento e AQS, descrito na secção 5.3, tendo sido avaliadas as seguintes alternativas,
 - MM3-1 - Instalação de novas caldeiras a gás natural;
 - MM3-2 – Instalação de caldeiras a biomassa;
 - MM3-3 - Instalação de bomba de calor;

- MM4 - Implementação de sistemas com recurso a fontes de energia renováveis apresentado em 5.4, tendo-se estudado as seguintes opções,
 - MM4-1- Instalação de um sistema solar térmico para apoio à produção de AQS;
 - MM4-2 - Instalação de um sistema fotovoltaico para produção de eletricidade.

Apresentam-se no gráfico da Figura 5.11 os custos de investimento associado a cada uma das medidas.

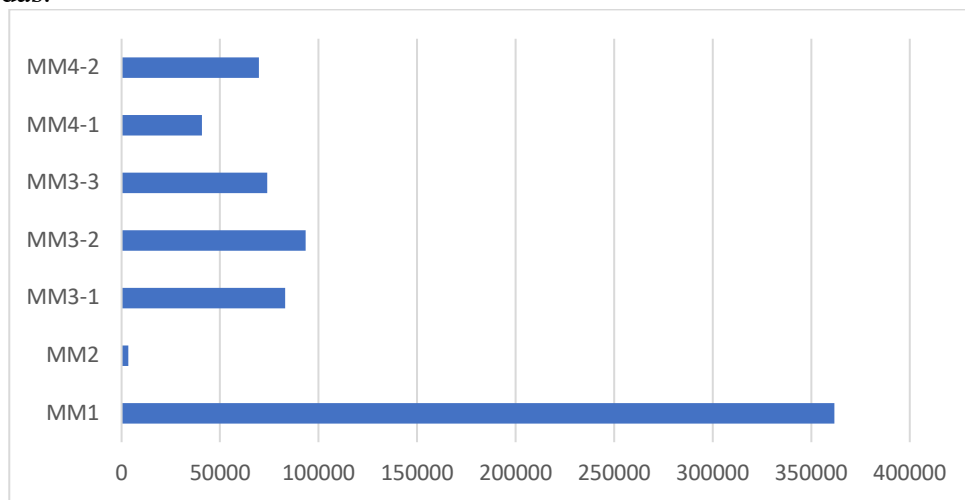


Figura 5.11 - Custos de investimento das medidas de melhoria (€)

No gráfico da Figura 5.12 encontra-se a redução de custo anual de energia que cada uma das medidas origina.

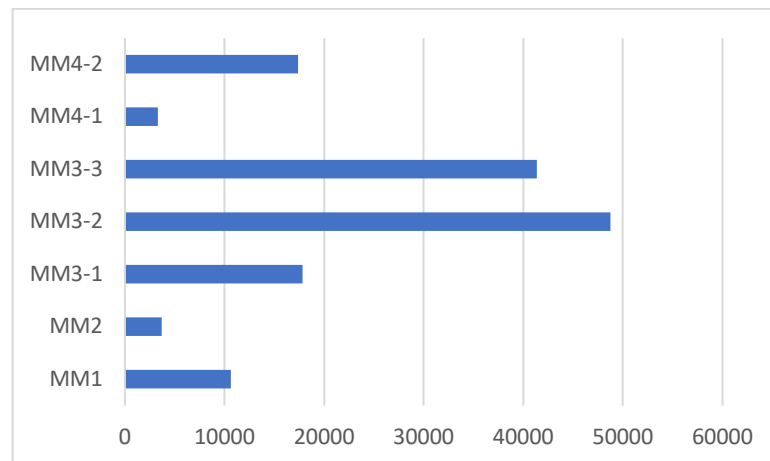


Figura 5.12 - Redução anual dos custos de energia das medidas de melhoria (€)

No gráfico da Figura 5.13, indicam-se os períodos de retorno associados a cada uma das medidas de melhoria, obtidos pelo rácio entre o custo estimado do investimento e a redução de custos correspondente à poupança de energia resultante da aplicação de medida.

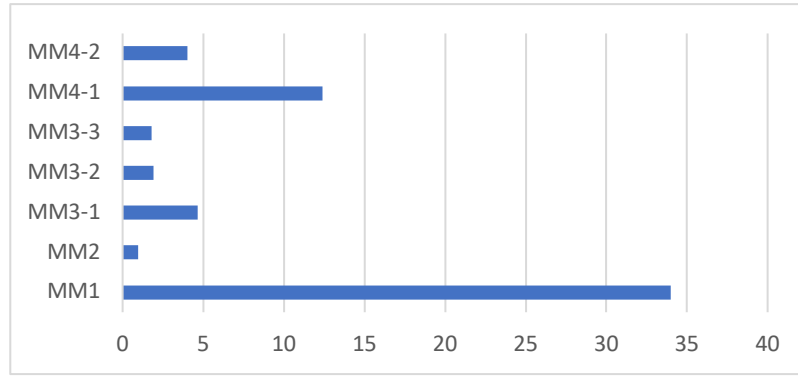


Figura 5.13 - Período de retorno das medidas de melhoria (anos)

5.6.2 Impacto na classe energética do edifício

Para além desta análise, procede-se agora à avaliação do impacto de cada uma das medidas na classe do edifício, R_{IEE} . No âmbito do RECS, para proceder à determinação da classe energética do edifício, é necessário ter-se em conta a previsão dos consumos de energia, com a aplicação de cada uma das propostas de melhoria, para efeitos de cálculo dos indicadores de eficiência (IEE) e respetiva classe energética (R_{IEE}). Recorde-se que,

$$R_{IEE} = \frac{IEE_S - IEE_{ren}}{IEE_{ref,S}} \quad (5.5)$$

$$IEE_S = \frac{\sum_i E_{S,i} \cdot F_{pu,i}}{A_p} \text{ (kWh}_{EP}/\text{m}^2\text{ano)} \quad (5.6)$$

$$IEE_{ren} = \frac{\sum_i E_{ren,i} \cdot F_{pu,i}}{A_p} \text{ (kWh}_{EP}/\text{m}^2\text{ano)} \quad (5.7)$$

em que,

$E_{S,i}$ - Representa o consumo de energia por fonte de energia i para usos do tipo S , (kWh/ano);

A_p - Designa a área interior útil de pavimento, (m^2);

$F_{pu,i}$ - Representa o fator de conversão de energia útil para energia primária para a fonte de energia i , ($\text{kWh}_{EP}/\text{kWh}$);

$E_{ren,i}$ - Designa a produção de energia a partir de fontes de origem renovável para consumo, por fonte de energia i , (kWh/ano).

Para calcular a classe energética do edifício haverá que efetuar duas simulações, para determinar os consumos de energia: uma para o edifício nas condições reais; e outra para o edifício nas condições de referência, descritas na legislação.

Para o edifício nas condições de referência adotam-se os mesmos perfis de utilização das condições reais, mas com as soluções construtivas e de sistemas definidas na legislação. Assim, para a envolvente opaca, utilizaram-se os valores de referência definidos na tabela I.09, enquanto para os envidraçados os valores definidos na tabela I.10 da portaria n.º 349-D/2013, com as alterações resultantes da portaria e n.º 17-A/2016 [45]. Para o sistema de aquecimento e AQS considerou-se uma caldeira com $\eta = 89\%$, de acordo a tabela I.18 e I.19 da portaria n.º 349-D/2013, com as alterações resultantes da portaria e n.º 17-A/2016 [45]. Na Tabela 5.33 apresentam-se os resultados das simulações efetuadas.

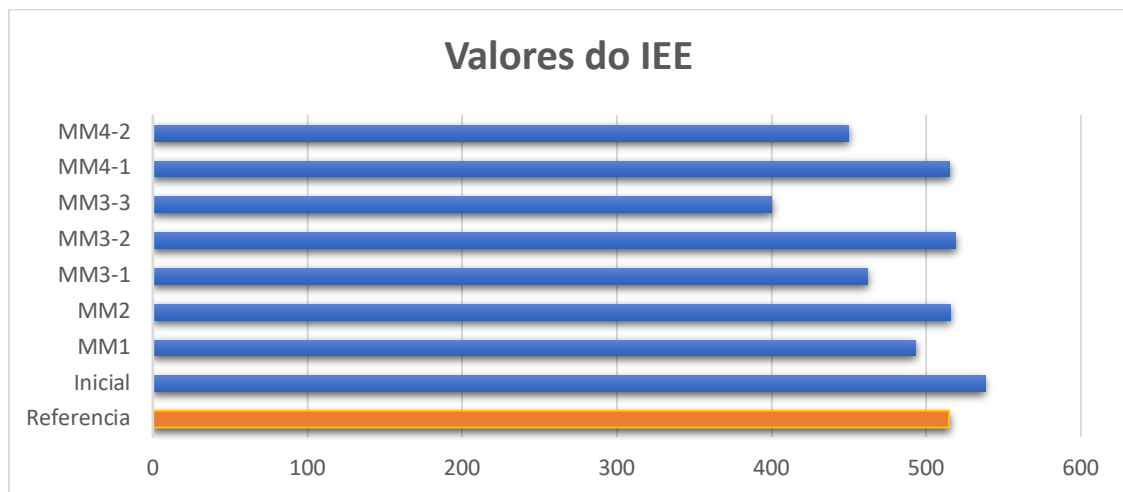
Tabela 5.33 - Valores utilizados para o cálculo da classe energética

	Iluminação	Aquecimento	AQS	Equipamentos
Edifício referência	114608	574797	92459	355342
Edifício atual	117485	691221	92459	355342
Edifício + MM1	117485	584855	92459	355342
Edifício + MM2	42600	714016	92459	355342
Edifício + MM3-1	117485	534125	71340	355342
Edifício + MM3-2	117485	652820	87193	355342
Edifício + MM3-3	117485	408012	54495	355342

Como anteriormente referido, é necessário converter a energia final (kWh/ano) para energia primária ($\text{kW}_{\text{EP}}/\text{ano}$), sendo os valores a considerar para os fatores de conversão, F_{pu} , por fonte de energia, os publicados no despacho n.º 15793-D/2013 [52]. Para determinar o valor do indicador de desempenho de referência, IEE_{ref} , seguiram-se todos os pressupostos definidos na portaria n.º 349-D/2013, com as alterações resultantes da portaria e n.º 17-A/2016 [45].

Foi também estudado o valor do indicador de desempenho para as medidas de melhoria que contemplam a implementação de sistemas com recurso a fontes de energia renováveis apresentado em 5.4.

No gráfico da Figura 5.14 encontra-se o valor do indicador de desempenho energético do edifício, na situação inicial, para o edifício referência, e o correspondente valor para cada uma das medidas de melhoria aplicadas.

Figura 5.14 - Valor do indicador de desempenho energético ($\text{kW}_{\text{EP}}/\text{ano}$)

No gráfico da Figura 5.15 consta o valor do RIEE associado a cada uma das medidas aplicadas isoladamente ao edifício.

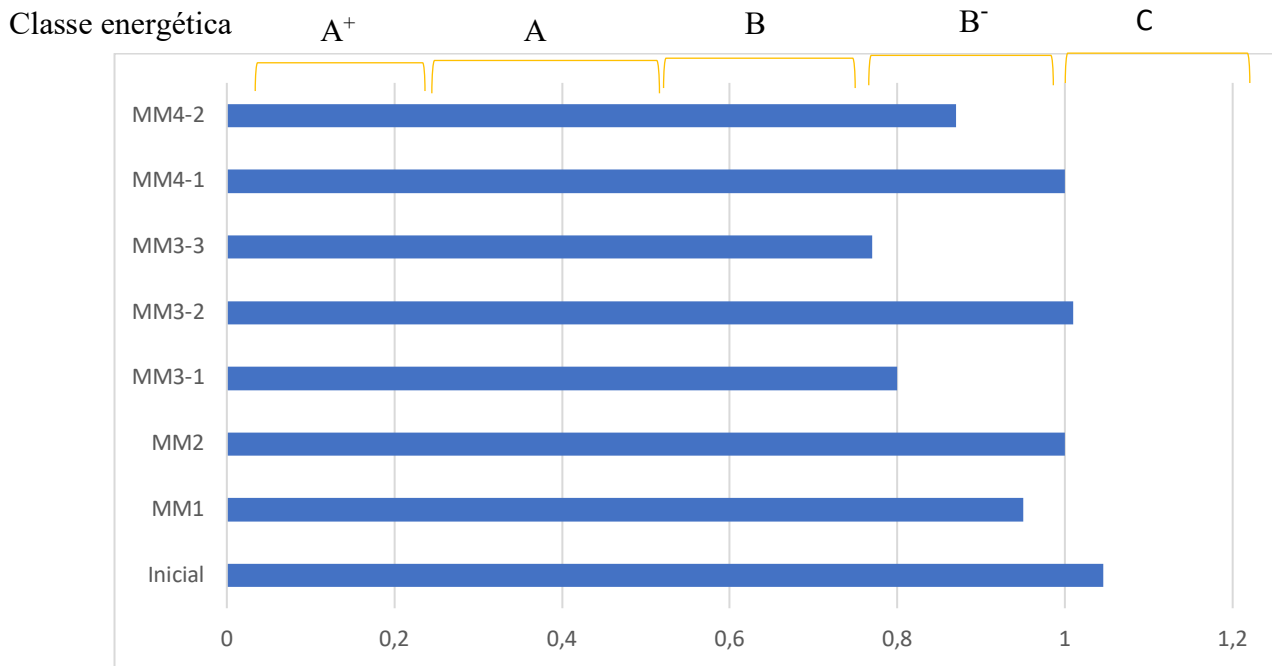


Figura 5.15 - Valor do R_{ITE} das medidas de melhoria

Como se verifica da análise do gráfico, a implementação de algumas das medidas reduzem as necessidades de energia do edifício, enquanto que com a implementação de outras conseguem-se reduzir os consumos de energia por aumento de eficiência do sistema; já com a proposta de instalação de sistemas de produção de energia com recurso a fonte renovável, é diminuído o consumo de energia da rede e os custos associados à fatura energética.

Em termos de classe energética, o edifício inicial classificava-se na classe energética C e com a aplicação isolada de algumas medidas o máximo que se conseguiu foi classificá-lo na classe energética B⁻, o que já tem influência positiva, desde logo em termos de valorização do imóvel, numa eventual alienação.

5.6.1 Requisitos nZEB

No caso da renovação de edifícios existentes com o objetivo nZEB, a questão fundamental está em encontrar o equilíbrio entre a aplicação de medidas de eficiência energética e a produção de energia renovável.

Assim, após análise das diferentes medidas de melhoria e diferentes combinações efetuaram-se as simulações com recurso ao software TRYNSYS, para determinação dos consumos de energia. Neste caso, a solução de reabilitação energética de nível nZEB, consiste em aplicar em simultâneo as seguintes medidas de melhoria pois a aplicação das medidas isoladas apenas permitiu atingir a classe energética B⁻.

- isolamento da envolvente (MM1);
- substituição do sistema de iluminação por um mais eficiente (MM2);
- Substituição das caldeiras por bomba de calor, aumentando a sua eficiência dos sistemas técnicos (MM3-3);

- implementação de sistemas de recurso a energia de fonte renovável (MM4-1 e MM4-2).

Com a aplicação em simultâneo destas medidas de melhoria, resultam as atuais necessidades de energia, que constam na Tabela 5.34.

Tabela 5.34 - Consumos de energia útil com aplicação simultânea das medidas de melhoria

Consumos de energia útil Tipos de utilização	Cenário inicial (kWh/ano)	Cenário com aplicação das medidas
Aquecimento	691221	163205
AQS	92459	25682
Iluminação	46994	17040
Equipamentos	142137	142137

Relativamente ao desempenho energético “medida de melhoria de nível NZEB (ou nZEB)”, o edifício caracteriza-se por apresentar um consumo anual de energia elétrica de 348064 kWh. Quando comparados estes consumos com os consumos anuais representativos da situação antes da aplicação desta solução combinada de melhoria, não há consumo de gás pois as caldeiras foram substituídas por bombas de calor. Apesar de o custo de aquisição no mercado do Kwh de eletricidade ser superior ao do gás natural, a solução da bomba de calor (MM3-3) também é melhor economicamente [Anexo E cenário 9]. No cenário inicial os custos anuais com energia são de 116.194€, e com esta solução passam a ser 69.612€, uma redução significativa.

Também foram estudadas as medidas de fornecimento de energia renovável (MM4-1 e MM4-2) [Anexo E cenário 10], designadamente um sistema solar térmico para apoio à produção de AQS e a instalação de um conjunto de painéis fotovoltaicos para produção de energia elétrica. As simulações e dimensionamento do sistema solar térmico e dos painéis fotovoltaicos foram obtidas com recurso ao software da ECO.AP [Anexos E cenário 11]. A solução proposta é a instalação de 11 coletores solares, ocupando uma área de 24,8 m². Relativamente aos painéis fotovoltaicos, a solução definida consiste na instalação de 448 painéis ocupando uma área de cobertura de 951m² com uma potência de 123 kW. Apresenta-se na Tabela 5.35 a energia produzida e os consumos de energia associados a cada um dos sistemas.

Tabela 5.35 - Energia produzida e consumos do sistema de fonte renovável

Solar térmico	Consumos AQS energéticos anuais	25682 kWh
	Energia produzida	15448 kWh
	Consumo de energia	12058 kWh
	Excedente de energia (no verão)	20%
	Contribuição do solar térmico	60%
Painéis fotovoltaicos	Consumos energéticos de eletricidade	334440 kWh
	Produção de energia solar	181006 kWh
	Autoconsumo	146280 kWh
	Energia excedentária	19%
	Consumo de energia renovável	44%

Na Tabela 5.36 constam os custos de investimento da instalação destes sistemas com recurso a fontes de energia renovável, e a redução anual dos custos de energia de cada um dos sistemas.

Tabela 5.36 - Custos e redução anual do custo de energia dos sistemas de fonte renovável

	Resultados
Investimento estimado com o solar térmico	13.620 €
Investimento estimado com os fotovoltaicos	110.820 €
Redução anual dos custos de energia	58%

Conclui-se assim que, em termos globais, a implementação do conjunto de medidas MM1, MM2, MM3-3, MM4-1 e MM4-2, e de um equipamento de arrefecimento, resulta num investimento estimado de **529.786 €** e um período de retorno de **8 anos**.

Com a aplicação em simultâneo das medidas de melhoria referidas, e a instalação do equipamento de arrefecimento com as características mencionadas, permite que este seja um edifício num nZEB pois, obtém-se um valor de $R_{IEE} = 0,33$, pelo que a classe energética do edifício passa a ser de **A**.

6 Viabilidade Económica

O presente capítulo tem como objetivo o estudo da viabilidade económica das medidas de melhoria identificadas no capítulo anterior, que tornam o edifício nZEB. Desse modo, procedeu-se à elaboração de um modelo económico mais detalhado para análise da solução de reabilitação energética do nível nZEB, pois a caracterização económica das diferentes medidas de melhoria apresentada na secção anterior, capítulo 5, é uma metodologia simplificada definida no despacho n.º 15793-L/2013 [59]. No entanto, a variação da inflação, a evolução da taxa de juro e/ou a variação do preço da energia (gás, eletricidade, etc) são alguns dos fatores que podem ocorrer e influenciar os resultados das medidas que se pretendem implementar.

Assim, o projeto de investimento associado às medidas de melhoria que permitirá ao edifício Pensionato da SCMPVarzim cumprir os requisitos nZEB, foi objeto de uma análise de investimento dinâmica, através do método do *Discounted cash-flow*, para averiguar se o investimento é viável e se realmente há um retorno esperado.

Por outro lado, dado o elevado valor do investimento que é necessário efetuar no edifício para que este cumpra os requisitos nZEB, foram também analisadas, recorrendo aos princípios da Investigação Operacional a implementação de apenas algumas medidas, tendo em conta a disponibilidade limitada do capital a investir, atualmente.

6.1 Método dos fluxos de caixa descontados

A análise de viabilidade económica ocorre numa ótica de previsão, que tem associada uma incerteza resultante da aleatoriedade e do risco intrinsecamente relacionados com essa previsão. O risco de um projeto de investimento prende-se, essencialmente, com a probabilidade do retorno esperado ser diferente do retorno proporcionado.

A variação da inflação, a evolução da taxa de juro e/ou a variação do preço da energia, como anteriormente referido, são alguns dos fatores que podem fazer aumentar o risco neste tipo de projetos de investimento. No entanto é possível diminuir o risco através de uma análise cuidada e efetuando previsões para as variáveis envolvidas, com base na extrapolação do passado e análises do mercado resultante de um prévio estudo fundamentado. O resultado da avaliação traduz-se pela apresentação de indicadores que permitem aos investidores tomar conhecimento sobre a viabilidade do projeto, sendo a sua implementação dependente de decisões estratégicas e da disponibilidade de financiamento para a sua concretização. O cálculo dos indicadores pressupõe o desenvolvimento dos cash-flows previsionais do projeto de investimento e o custo do capital.

Para averiguar a taxa interna de rentabilidade do projeto como um todo, ou seja o investimento necessário para tornar o edifício nZEB, o qual agrega as medidas de melhoria MM1, MM2, MM3-3, MM4-1, MM4-2 e a MM5, utilizou-se o método do *discounted cash flow*, numa abordagem dinâmica (cujos cálculos constam no Anexo F).

O investimento total inicial encontra-se na discriminado na Tabela 6.1

Tabela 6.1 - Investimento das medidas de melhoria

Medidas de Melhoria	Investimento
Sistema de arrefecimento	40.140 €
Bomba de calor	40.050 €
Implementação das luminárias LED	3.565,80 €
Envolvente exterior	361.730,10 €
Solar Térmico	13.620 €
Painel Fotovoltaico	110.820 €

A estes investimentos, e como é habitual em projetos de construção que estão sujeitos a licenças, vistorias e análises técnicas, acrescentou-se 3% ao valor inicial para refletir os custos administrativos de licenças e outros inerentes a este tipo de obras, para os custos de projeto e fiscalização considerou-se 6% (3%+3%) e para encargos financeiros 5%, pelo que o total do investimento corresponde a um valor de 639.000,92€. Consideraram-se ainda, como despesas, os custos de manutenção anuais dos novos equipamentos, utilizando as recomendações constantes dos quadros do anexo E do guia da DGEG [67], resultando num valor de cerca de 2.000 € anuais.

Definido o investimento total inicial, considerou-se que as obras de reabilitação teriam a duração de 1 ano, acabando, portanto, no início de 2022. A taxa interna de retorno (TIR) evidencia o nível de retorno que resulta de um projeto, e que é equivalente à taxa de desconto para a qual se terá um valor atualizado líquido (VAL), nulo. Neste caso a TIR foi calculada para um período de 25 anos que, de acordo, com a orientação do anexo E do guia da DGEG [67], seria a menor vida útil de todas as medidas de melhoria.

Relativamente às receitas que foram consideradas no modelo, correspondem à poupança energética anual que corresponde ao valor de 66.888€, acrescidas dos custos de manutenção dos antigos equipamentos substituídos, bem como da manutenção atual da envolvente exterior (envidraçados, caixilharia, fachada, etc.) que se deixam de verificar, uma vez que o edifício será objeto de reabilitação, e estimados em 13.000 €/ano de acordo com os custos históricos, face à área e idade do edifício. No primeiro ano, considerou-se ainda o apoio financeiro que é possível obter ao abrigo do programa “Casa eficiente 2020”, tendo sido estimada uma comparticipação de 8.500€, que entrou como receita no projeto de investimento.

Assim, com ajuda da folha de cálculo Excel que se encontra no anexo F, e com base nas expectativas de *cash flow* (despesas, no início, com a obras de reabilitação, e as receitas, aos longo dos anos, equivalentes às poupanças energéticas), que o projeto de investimento irá gerar ao longo dos anos, atualizadas à data atual, foi possível calcular a TIR do projeto, para os 25 anos, tendo-se obtido um valor de 11,5%, que demonstra a rentabilidade do projeto de reabilitação. Além disso calculou-se o VAL, que representa, a soma de todas as entradas e saídas de dinheiro durante a vida útil de um projeto, para o momento presente, tendo-se obtido um valor de 484.007€, correspondente a uma taxa de atualização de 6%, o que demonstra a sua viabilidade do projeto de reabilitação estudado na (Tabela 6.2).

Tabela 6.2- Viabilidade do projeto de investimento

VAL	484.007 €
Taxa de atualização	6%
TIR	11,5%

6.2 Modelo de otimização de programação linear

Como anteriormente referido, dada a condicionante monetária de 250.000€ de capitais próprios que foi fixada pelo proprietário para investimento nesta fase, foram estudadas as melhores medidas a implementar no imediato, considerando a referida limitação. Dadas as diferentes medidas de melhoria que são possíveis aplicar para melhorar o desempenho energético deste edifício, as quais foram objeto de análise neste trabalho, desenvolveu-se um modelo de otimização para auxiliar na tomada de decisão, sobre quais os investimentos prioritários face ao limite de verba disponível.

No entanto, com a implementação deste modelo, pretende-se avaliar, não apenas a verba envolvida no investimento, que é um fator condicionante, mas também a redução dos custos energéticos associados a cada uma das diferentes medidas de melhoria que podem ser implementadas, bem como o rácio entre o investimento e a redução de custos, ou seja, o período de retorno. Assim sendo, delineou-se um modelo de otimização que pretende conciliar estes dois objetivos diferentes e eventualmente antagónicos: a redução de custos energéticos anuais e um período de retorno pequeno para o investimento nas soluções de melhoria.

Para se conseguir obter as melhores soluções de compromisso, algumas das medidas de melhoria foram desagregadas de modo a permitir implementações parciais, em vez de implementar a medida como um todo, dado o esforço monetário que algumas das medidas implicam. Nesses termos, a medida de melhoria da envolvente, MM1, e a medida de substituição dos equipamentos técnicos, MM3, foram subdivididas em medidas que apenas consideram uma das ações isoladamente. Para a medida de melhoria da envolvente, MM1.j foram consideradas as seguintes 4 medidas parciais ($j=1, \dots, 4$):

- MM1.1 - alteração nos vãos envidraçados, substituição dos vidros e caixilharia;
- MM1.2 - isolamento das fachadas exteriores com XPS;
- MM1.3 - intervenção ao nível das coberturas reforçando o isolamento;
- MM1.4 - isolamento da laje de pavimento do edifício.

Ao nível da medida de melhoria da eficiência dos equipamentos técnicos, MM3, foram contempladas as seguintes possibilidades:

- MM3.i - substituição das atuais caldeiras tendo-se considerado $i=1,2,3$ em que,
 - $i=1$ contempla a troca por caldeiras novas a gás natural;
 - $i=2$ representa a troca por caldeiras a biomassa;
 - $i=3$ representa a troca das caldeiras por bomba de calor;

Foi ainda contemplada a substituição de apenas uma das caldeiras, tendo-se usado a nomenclatura H (Heat) para a caldeira de aquecimento e AQS para a caldeira destinada às águas quentes sanitárias, tendo o índice i a designação anterior:

- MM3.iH - substituição, apenas, da caldeira destinada ao aquecimento com $i=1,2,3$;
- MM3.iAQS - troca da caldeira destinada à produção de AQS com $i=1,2,3$.

Para cada uma das medidas associadas a alterações na envolvente, MM1.j ($j=1,2,3,4$) foi necessário a obtenção dos consumos energéticos associados, pelo que se recorreu ao software TRNSYS para a obtenção dos valores das necessidades térmicas de aquecimento, dos consumos associados e a respetiva redução correspondente à medida a analisar.

Na Tabela 6.3 encontram-se discriminados, para cada uma das medidas, os valores do investimento estimado envolvido, a redução dos custos energéticos anuais e o período de retorno.

Tabela 6.3 - Caracterização das medidas de melhoria

Medida	Investimento (€) (Ii)	Redução (€) (Ri)	PRS (anos) (PSRi)
MM1.1	48.752,00 €	7.895,15 €	6,17
MM1.2	108.000,00 €	28.569,10 €	3,78
MM1.3	135.000,00 €	10.107,26 €	13,36
MM1.4	69.978,00 €	16.873,24 €	4,15
MM1	361.730,00 €	10.637,10 €	34,01
MM2	3.565,80 €	3.711,80 €	0,96
MM3.1	82.942,00 €	17.821,05 €	4,65
MM3.1H	53.520,00 €	15.710,10 €	3,41
MM3.1AQS	29.422,00 €	2.111,90 €	13,9
MM3.2	93.242,00 €	48.767,30 €	1,91
MM3.2H	53.520,00 €	43.009,80 €	1,24
MM3.2AQS	39.722,00 €	5.758,00 €	6,8
MM3.3	73.976,00 €	41.367,9 €	1,79
MM3.3H	40.140,00 €	36.481,60 €	1,10
MM3.3AQS	33.836,00 €	4.886,30 €	6,9
MM4.1	40.680,00 €	4.730,00 €	8,6
MM4.2	69.634,00 €	17.413,00 €	4,00

6.2.1 Modelo Matemático

O problema a resolver é um problema de otimização combinatória, no qual se pretende maximizar a redução dos custos energéticos anuais e minimizar o período de retorno. Por um lado, tem-se,

$$f_1 = \text{redução de custos} \quad (6.1)$$

$$f_2 = \text{período de retorno.} \quad (6.2)$$

Para combinar estas duas funções numa única função, definiu-se uma função objetivo para o modelo, que é o resultado da ponderação dos dois objetivos parcelares, agregando desta forma na mesma função objetivo os dois propósitos pretendidos. De acordo com [79] tal pode ser efetuado considerando a função,

$$f(x) = \max(\alpha_1 f_1(x) + \alpha_2 f_2(x)) \text{ com } \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad (6.3)$$

em que α_1 e α_2 são fatores positivos que traduzem o relevo de cada uma das componentes na função objetivo.

Ora, uma vez que os valores a otimizar, ou seja, a redução dos custos energéticos anuais, têm um intervalo de variação desde 2.111 € até 48.767 € (coluna 3 tabela 6.3), e o intervalo de valores referente ao período de retorno é de 0,96 a 34 anos (coluna 4 da tabela 6.3), efetuou-se a sua normalização de modo que todos os valores estejam compreendidos no mesmo intervalo de [0, 1]. Nesta normalização teve-se em consideração que se pretende maximizar a redução de custos e minimizar o período de retorno, tendo-se adotado o seguinte procedimento:

$$RNi = \frac{Ri}{R^*}, \text{ em que } R^* = \max_i(Ri) \quad (6.4)$$

$$PRNi = \frac{PRS^*}{PRSi}, \text{ em que } PRS^* = \min_i(PRSi) \quad (6.5)$$

em que,

RNi - É o valor normalizado da redução de custos energéticos anuais da medida de melhoria i ;

$PRNi$ representa o valor normalizado do período de retorno da medida de melhoria i .

Como referido anteriormente, pretende-se que a função objetivo (FO) considere os dois propósitos em análise, ou seja, a redução de custos e a minimização do período de retorno, pelo que se adotaram os fatores de ponderação α_1 e α_2 com $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ associado a cada um dos propósitos, de acordo com a importância [79], resultando no seguinte:

$$FO: \max(\alpha_1 RNi + \alpha_2 PRNi), \text{ em que } \alpha_i \geq 0 \text{ com } \sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1. \quad (6.6)$$

As variáveis decisões associadas a este modelo são variáveis binárias, que indicam se a medida de melhoria vai ou não ser implementada,

$$MMi = \begin{cases} 1, & \text{se a medida de melhoria } i \text{ é implementada} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}.$$

Assim, o conjunto de restrições consideradas no modelo foi,

$$\sum_i I_i MMi \leq \text{Valor máximo a investir} \quad (6.7)$$

$$MM1 + MM1.j \leq 1, \forall j = 1,2,3,4 \quad (6.8)$$

$$\sum_{j=1}^3 MM3.j + \sum_{j=1}^3 MM3.jH \leq 1 \quad (6.9)$$

$$\sum_{j=1}^3 MM3.j + \sum_{j=1}^3 MM3.jAQS \leq 1 \quad (6.10)$$

As restrições são as condicionantes do modelo, que asseguram a obtenção de uma solução válida. Assim, a restrição (6.7) assegura que não é ultrapassado o valor do montante máximo a investir. Já o grupo de restrições (6.8) impede a implementação da mesma medida de melhoria ao nível da envolvente. Como a medida MM1 engloba todas as intervenções na envolvente (fachadas, envidraçados, cobertura e piso), a restrição (6.8) assegura que para cada valor de j ($j=1,2,3,4$) ou é implementada a medida global MM1, ou poderá ser implementada uma das medidas parciais, ou seja, MM1.1, MM1.2, MM1.3 ou MM1.4:

$$\begin{aligned}
MM1 + MM1.1 &\leq 1 \text{ para } j = 1; \\
MM1 + MM1.2 &\leq 1 \text{ para } j = 2; \\
MM1 + MM1.3 &\leq 1 \text{ para } j = 3; \\
MM1 + MM1.4 &\leq 1 \text{ para } j = 4;
\end{aligned}$$

Refira-se que o modelo não limita o número de medidas parciais da envolvente, MM1.1, MM1.2, MM1.3 ou MM1.4 a implementar.

Quanto às restrições (6.9) e (6.10) dizem respeito à medida de melhoria MM3 e asseguram que a solução a determinar, apenas admite a troca das duas caldeiras no máximo uma vez, enquanto a restrição (6.9) assegura que a solução apenas admite no máximo a substituição da caldeira existente destinada a aquecimento por uma outra.

Já a restrição (6.10) é equivalente à restrição (6.9) mas diz respeito às caldeiras para AQS. Note-se que o modelo admite a possibilidade da caldeira destinada a AQS ser de um tipo diferente da caldeira destinada ao aquecimento, ou que a melhoria a implementar passe apenas pela substituição de uma delas.

6.2.2 Análise da Solução

O problema foi resolvido com recurso ao *solver* um suplemento do *Excel* [Anexo G] para um valor máximo de investimento de 250.000€. Foram efetuadas simulações testando diferentes valores para os fatores de ponderação da função objetivo FO, com base num critério em que se atribuiu progressivamente diferentes valores de 0 até 1. Tendo em atenção o valor máximo estipulado para o investimento, o grupo de restrições (6.8) é redundante, pois a medida MM1 tem um valor de investimento que ultrapassa esse montante máximo.

Na Tabela 6.4 resumem-se as soluções obtidas para cada uma das simulações e o valor do investimento associado.

Tabela 6.4 - Soluções obtidas do problema de otimização

Soluções	Ponderações	Medidas de melhoria	Investimento (€)
1	$\alpha_1 = 0;$ $\alpha_2 = 1$	MM1.1 ; MM2; MM3.2AQS; MM3.3H; MM4.1 ; MM4.2	242.494 €
2	$\alpha_1 = 0,1;$ $\alpha_2 = 0,9$	MM1.1; MM1.4; MM2; MM3.3H; MM4.2	232.070 €
3	$\alpha_1 = 0,2;$ $\alpha_2 = 0,8$	MM1.1; MM1.4; MM2; MM3.3H; MM4.2	232.070 €
4	$\alpha_1 = 0,3;$ $\alpha_2 = 0,7$	MM1.1; MM1.4; MM2; MM3.3H; MM4.2	232.070 €
5	$\alpha_1 = 0,4;$ $\alpha_2 = 0,6$	MM1.1; MM1.4; MM2; MM3.3H; MM4.2	232.070 €
6	$\alpha_1 = 0,5;$ $\alpha_2 = 0,5$	MM1.1; MM1.4; MM2; MM3.2H; MM4.2	245.450 €
7	$\alpha_1 = 0,6;$ $\alpha_2 = 0,4$	MM1.2; MM2; MM3.2H; MM4.2	234.720 €
8	$\alpha_1 = 0,7;$ $\alpha_2 = 0,3$	MM1.2; MM2; MM3.2H; MM4.2	234.720 €

9	$\alpha_1 = 0,8;$ $\alpha_2 = 0,2$	MM1.2; MM2; MM3.2H; MM4.2	234.720 €
10	$\alpha_1 = 0,9;$ $\alpha_2 = 0,1$	MM1.2; MM2; MM3.2H; MM4.2	234.720 €
11	$\alpha_1 = 1;$ $\alpha_2 = 0$	MM1.2; MM2; MM3.2H; MM4.2	234.720 €

No gráfico da Figura 6.1 apresenta-se a redução de custos energéticos anuais associado a cada uma das soluções.

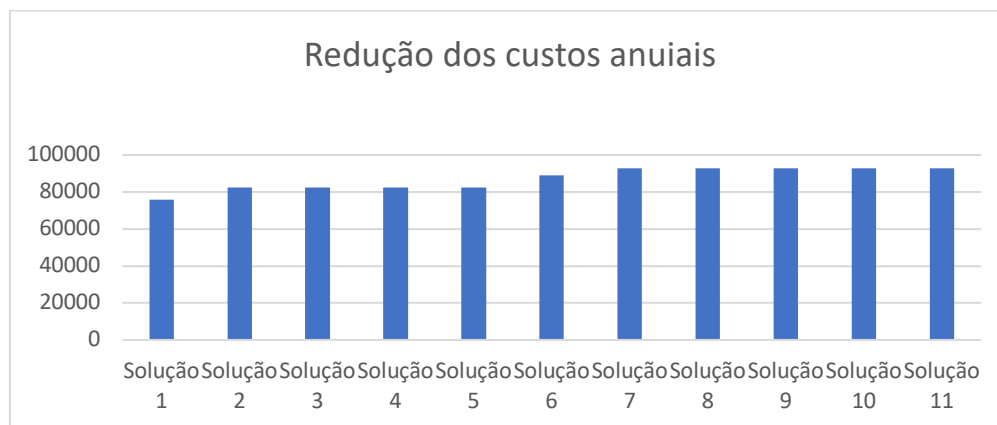


Figura 6.1 - Comparação das soluções do problema de otimização, redução de custos

No gráfico da Figura 6.2 indica-se o período de retorno associado a cada uma das soluções:

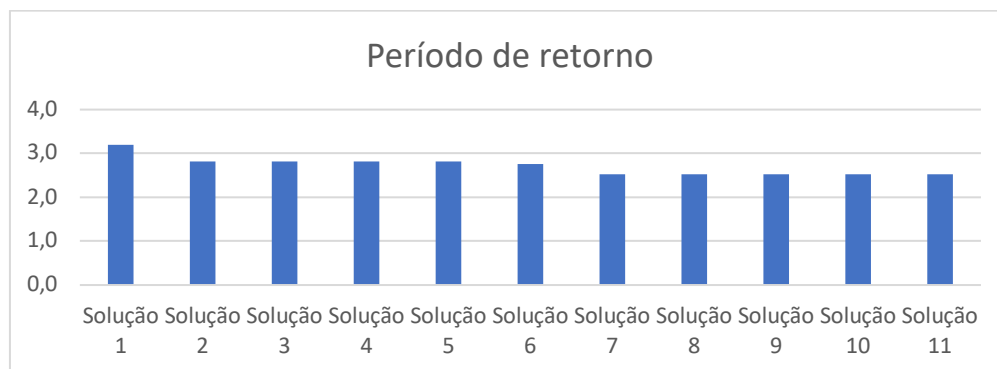


Figura 6.2 - Comparação das soluções do problema de otimização, período de retorno

Ao analisar as diferentes soluções obtidas, verifica-se que há um conjunto de soluções (6, 7 8 e 9) que são iguais e que correspondem à melhor solução de compromisso, dadas as condicionantes económicas, e considerando as várias ponderações da função objetivo.

Esta solução consiste em intervir na envolvente, designadamente no isolamento da fachada, na substituição das lâmpadas por lâmpadas do tipo LED, na substituição da caldeira destinada ao aquecimento por uma caldeira de biomassa e na instalação de painéis fotovoltaicos. A implementação deste conjunto de medidas de melhoria permite classificar o edifício na classe

energética **B** e corresponde a um investimento de **234.720€**, respeitando os limites orçamentais impostos.

7 Conclusões

Neste trabalho, foram estudadas várias soluções de reabilitação visando a melhoria da eficiência energética de um imóvel da SCMPVarzim a funcionar atualmente como estrutura residencial para idosos. Nas condições atuais, e considerando a atividade a que o edifício se destina e a sua localização, as caldeiras a gás natural para aquecimento e produção de AQS são os principais consumidores de energia (80% do total).

Sendo um edifício antigo, com mais de 50 anos, sem alterações significativas, apresenta um conjunto de debilidades construtivas que não permitem que se encaixe nos novos regulamentos e exigências energéticas, pelo que foram estudadas diferentes medidas de melhoria seguindo a hierarquia definida no despacho n.º 7113/2015, de 29 de junho, em prol da melhoria da sua eficiência energética, designadamente:

- Melhoria da envolvente incluindo paredes, coberturas, pavimentos e janelas que permita uma redução das necessidades de energia útil;
- Melhoria da eficiência dos sistemas técnicos;
- Implementação de sistemas com recurso a fontes de energia renovável.

Com a utilização do software TRNSYS e dos simuladores da ECO.AP foram estudadas, numa primeira fase, diferentes possibilidades de investimento, tendo em vista a melhoria da eficiência energética do edifício, designadamente:

- Substituição dos elementos da envolvente opaca, com um custo de 312.978 e uma redução de 15% do consumo anual de gás natural;
- Substituição dos vãos envidraçados, com valor de investimento de 48.752 €, e uma poupança energética de 7.895 €/ano;
- Considerando o isolamento da envolvente opaca e a alteração dos vãos envidraçados (medida MM1), há uma redução no valor do desempenho energético, passando a classe energética do edifício a ser B-;
- Troca das atuais caldeiras por bombas de calor, que não alterando a dinâmica térmica do edifício, permite reduzir os atuais consumos de energia em cerca de 55%, poupando cerca de 41.000 €/ano, alterando também a classe energética do imóvel para B-, quer no caso da substituição por novas caldeiras a gás natural mais eficientes, quer na sua substituição por bombas de calor;
- Substituição das lâmpadas existentes por outras mais eficientes, do tipo LED, medida económica e de fácil implementação, originando a redução do consumo de energia elétrica, em 29954 kWh, ou seja, uma redução de 63%;
- Instalação de coletores solares com um custo de 40.680€ que permitirá a satisfação de 59% das necessidades de AQS e instalação de painéis fotovoltaicos, com um custo de 69.634€, que garantem 44% de autossuficiência, um pouco abaixo do desejado, que seria na ordem dos 50%.

No entanto, para que o edifício cumpra os requisitos nZEB, é necessário a agregação de todas as soluções, designadamente o isolamento da envolvente exterior (MM1), a substituição das caldeiras por bombas de calor (MM3), a substituição das lâmpadas por LED (MM2) e o contributo das energias renováveis com a consideração de coletores solares e sistemas solares fotovoltaicos (MM4), e ainda a incorporação de um sistema de arrefecimento, um *chiller* de condensação a água (MM5), resultando uma redução de 79% dos consumos energéticos associados ao aquecimento, de 76% dos consumos com AQS, para além de 63% de redução nos consumos com iluminação.

Ou seja, verifica-se que somente se for aplicado o conjunto de medidas MM-1, MM-2, MM3-3; MM4-1, MM4-2 e MM5 é que é possível reabilitar o edifício e torná-lo num nZEB, sendo o investimento necessário na ordem dos 600.000€, de que resulta, conforme análise económica efetuada através do método do *discounted cash-flow*, num VAL de 484.006€, e

numa TIR de 11,5% o que se considera bastante aceitável, face às atuais condições de mercado e da economia.

No entanto, apesar da importância da requalificação energética do edifício, não existe disponibilidade do promotor para efetuar a totalidade do investimento em simultâneo, dispondo apenas de 250.000 €, pelo que, de modo a determinar o melhor compromisso entre a disponibilidade financeira e o desempenho energético do edifício, foi desenvolvido um modelo de otimização combinatória, definindo-se uma função objetivo que pondera os custos de redução energética normalizados e o período de retorno normalizado de acordo com o despacho n.º 15793-L/2013 [59].

De acordo com os resultados apresentados, verificou-se que a solução de compromisso que melhor se ajusta a esta limitação financeira e não inviabiliza a possibilidade de futuramente o edifício ser nZEB, consiste em intervir na envolvente com isolamento da fachada, na substituição das lâmpadas por lâmpadas do tipo LED, na substituição da caldeira destinada ao aquecimento por uma caldeira de biomassa e na instalação de painéis fotovoltaicos.

Assim, as conclusões deste trabalho, podem resumir-se no seguinte

- Nas condições atuais do edifício é viável a sua requalificação energética para ser classificado como nZEB
- Essa requalificação consiste nas seguintes intervenções: isolamento da fachada (MM1), melhoria da eficiência dos sistemas técnicos nomeadamente a substituição das caldeiras por bombas de calor (MM3), substituição das lâmpadas por lâmpadas mais eficientes do tipo LED (MM2), incorporação de sistemas com recurso a energias renováveis com a consideração de coletores solares e sistemas solares fotovoltaicos (MM4) e a instalação de um sistema de arrefecimento (*chiller*) de condensação a água (MM5);
- O valor de investimento no projeto é de 600.000, com uma TIR de 11,5% e um VAL de 484.006€;
- Considerando as limitações financeiras do promotor de 250.000 €, deve-se privilegiar a intervenção de isolamento na fachada, substituição das lâmpadas, substituição da caldeira, e instalação de painéis fotovoltaicos.

Por fim, não se pode deixar de referir as limitações que surgiram no desenvolvimento deste trabalho, uma vez que as visitas ao edifício foram reduzidas e muitas vezes adiadas ou canceladas devido à pandemia Covid-19, também por se tratar de uma estrutura residencial para idosos, grupo de elevado risco.

No entanto, apesar das condicionantes, entendemos que os objetivos a que nos propusemos com o presente trabalho foram alcançados.

7.1 Trabalhos Futuros

Como sugestões de trabalho futuro, no sentido do melhoramento do modelo desenvolvido, será importante efetuar um levantamento de dados mais dirigidos para os parâmetros cuja modelação se simplificou, ou na qual se utilizaram parâmetros tipo de acordo com a tipologia da atividade em exploração no edifício.

Uma outra questão que acabou por não ser analisada neste trabalho, mas que também se encontra regulamentada e é bastante importante e, de certa forma complementar desta análise, é a qualidade do ar interior do edifício. Como tal, considera-se que de futuro se deverá proceder à realização de uma auditoria e ao estudo da melhoria da qualidade do ar interior do edifício, especialmente tratando-se de uma estrutura residencial para idosos.

O estudo do histórico de faturas, bem como a análise de telecontagens ou a obtenção dos consumos reais através de analisadores de energia, também devem ser ponderados para melhor compreensão dos perfis energéticos diários associados ao edifício.

Referências

- [1] JN 2020, “Mais de metade da população mundial está confinada em casa”, Jornal de Notícias, <https://www.jn.pt/mundo/mais-de-metade-da-populacao-mundial-esta-confinada-em-casa-12043190.html>, consultado em abril 2020.
- [2] M. Erlandsson, M. Borg M., “Generic LCA - methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs”, Building and Environment, 38(7) pp. 919-938, fevereiro 2003.
- [3] Diretiva (UE) 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios.
- [4] D. Crawley, S. Pless, P. Torcellini, “Getting to net zero”, ASHRAE Journal, setembro 2009.
- [5] N. Aste, R. S. Adhikari, and C. Del Pero, “Photovoltaic technology for renewable electricity production: towards net zero energy buildings”, International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), pp.446-450, Ischia, Italy junho 2011.
- [6] M. Z. Jacobson, “Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security”, Energy & Environmental Science, volume 2, 2009.
- [7] Diretiva (UE) 2002/91/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios.
- [8] W. Feist, “Research Project Passive Houses”, Passive House Institute (PHI), Darmstadt, Germany, 1988.
- [9] Breeam Group, “BREEAM: The Environmental Assessment Method for Buildings Around the World”, British Research Establishment, Watford, United Kingdom, 1990.
- [10] U.S Green Building Council, “Leadership for Energy and Environment Design”, Washington D.C., U.S.A, 2000.
- [11] Korean Government, Measures to Develop Green Cities and Buildings, 2009.
- [12] Diretiva (UE) 2012/27/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 outubro de 2012, relativa à eficiência energética.
- [13] Decreto-Lei n.º 118/2013, Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços.
- [14] I. Sartori, A. Napolitano, and K. Voss, “Net zero energy buildings: a consistent definition framework”, Energy and Buildings vol. 48, pp. 220-232, 2012.
- [15] M. Herrando, D. Cambra, M. Navarro, L. de la Cruz, G. Millán, and I. Zabalza, “Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and real energy consumption”, Energy Convers. Manag., vol. 125, pp. 141–153, 2016.
- [16] Global Energy Statistical Yearbook, 2020, Enerdata, <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>, consultado em maio de 2020.
- [17] International Energy Agency, IEA, <https://www.iea.org>, consultado em janeiro de 2021.
- [18] União da Energia, <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/energy-union>, consultado em dezembro de 2020.
- [19] COM(2011) 885 “Energy Road Map 2050”, Comissão Europeia.
- [20] Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios.
- [21] Observatório da Energia, DGEG Direção Geral de Energia e Geologia, <http://www.dgeg.pt/>, consultado em dezembro 2020.
- [22] PNEC 2030, Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030, dezembro 2019.
- [23] COM(2020) 522 Council Recommendation Comissão Europeia.
- [24] (UE) N° 244/2012 Regulamento Delegado da Comissão Europeia, de 16 de janeiro de 2012.
- [25] Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018.
- [26] Diretiva (UE) 2018/2002 Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de dezembro de 2018.

- [27] Recomendação da Comissão Europeia (UE) 2019/1019, Jornal Oficial da União Europeia de 7 de junho de 2019, L 165/70-128.
- [28] Recomendação da Comissão Europeia (UE) 2019/786, Jornal Oficial da União Europeia de 8 de maio de 2019 L 127/34-79.
- [29] RNC 2050, Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019, de 1 de julho de 2019, Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050.
- [30] ELPRE 2021, Resolução do Conselho de Ministros n.º 8-A/2021, de 3 de fevereiro de 2021.
- [31] H. Gonçalves “Em direção aos edifícios de Balanço Energético Zero”, Jornadas de Climatização, Ordem dos Engenheiros, 2011.
- [32] D'Agostino et al., “Synthesis Report on the National Plans for NZEBs”, EUR 27804, doi: 10.2790/659611.
- [33] Erhorn-Kluttig H., Erhorn H., “National applications of the NZEB definition – The complete overview”, Concerted Action Energy Performance of Buildings, 3 de 2018.
- [34] European Commission, “Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU”, Final Report, 2019.
- [35] Decreto-Lei n.º 101-D/2020, de 12 de julho de 2020, Diário da República 1ª Série n.º 237, pp.21- 45.
- [36] Decreto-Lei n.º 64/2020, de 10 de setembro, Diário da República 1ª Série n.º 77, pp. 2 - 10.
- [37] Decreto-Lei n.º 194/2015, de 14 de setembro de 2015, Diário da República 1ª Série n.º 179, pp. 7899 - 7922.
- [38] Portaria n.º 42/2019, 30 de janeiro de 2019, Diário da República 1ª Série n.º 21, pp. 771 - 772.
- [39] Portaria n.º 98/2019, de 2 de abril de 2019, Diário da República 1ª Série n.º 65, pp. 1816 - 1818.
- [40] IPMA Instituto Português do Mar e da Atmosfera, <https://www.ipma.pt>, consultado em janeiro 2021.
- [41] BPIE 2011, Principles For Nearly Zero-Energy Buildings.
- [42] Pless S., Torcellini P., “A Classification System Based, Renewable Energy Supply Options”, Net-Zero Energy Buildings: NREL/TP-550-44586, junho 2010.
- [43] Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, 3 de dezembro de 2013.
- [44] U.S. Department of Energy, “Energy Efficiency Building Envelope,” http://www2.lbl.gov/mfea/assets/docs/posters/17_MEAW_Poster_Selk_Envelope_Final.pdf, consultado em outubro 2020.
- [45] Portaria n.º 349-D/2013 de 2 de dezembro de 2013, Diário da República 1ª Série n.º 233, pp. 6628(40) - 6628(73).
- [46] Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, 3 de dezembro de 2013, Diário da República 2ª Série n.º 234, pp. 35088(58) - 35088(87).
- [47] Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de abril de 2006, Diário da República 1ª-A Série n.º 67, pp. 2416 - 2468.
- [48] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE “Handbook Fundamentals”, 2017.
- [49] Mateus D., “Transição Energética em Portugal Edifícios e espaço público”, maio 2019, Leiria Energy Day 2019.
- [50] COM (2020) 662, Comissão Europeia, “A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives”, 14 de outubro 2020.
- [51] Portal da Energia, <https://www.portal-energia.com>, consultado em fevereiro 2021.
- [52] Despacho (extrato) n.º 15793-D/2013, 2 de dezembro de 2013, Diário da República 2ª Série n.º 234, pp. 35088(13) - 35088(13).

- [53] EPAL Grupo de Águas de Portugal, <https://www.epal.pt>, consultado em janeiro 2021.
- [54] Despacho n.º7113/2015 de 29 junho de 2015, Diário da República 2ª Série nº 124, pp. 17351 - 17358.
- [55] APFAC, “Aplicação de XPS em sistema ETICS e suas vantagens” https://www.apfac.pt/eventos/seminario_fachadas_energeticamente_eficientes_2014/07%20Vera%20Silva%20Iberfibran.pdf, consultado em março 2021.
- [56] ADENE, Guia SCE -Avaliação de Requisitos (RECS), https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2020/04/5.3-Guia-SCE---Avaliação-de-Requisitos-RECS_V1-1.pdf, consultado em março 2021.
- [57] Documentação do software WINDOW7, <https://windows.lbl.gov/tools/window>, consultado em dezembro 2020.
- [58] Energia.pt, “Iluminação led poupe energia e dinheiro”, <http://www.energia.pt/pt/iluminacao-led>, consultado em fevereiro 2021.
- [59] Despacho (extrato) n.º15793-L/2013 de 3 de dezembro de 2013, Diário da República 2ª Série nº 234, pp. 35088(88) - 35088(88).
- [60] Portaria n.º 303/2019 de 12 de setembro de 2019, Diário da República 1ª Série nº 175, pp. 135 - 136.
- [61] PHILIPS, <http://www.lighting.philips.pt>, consultado em março 2021.
- [62] Portal da Energia, <https://www.portal-energia.com>, consultado em fevereiro 2021.
- [63] Edifícios e Energia, “Novidades no Programa ECO.AP: Calculadoras e Simulador de Desempenho Energético”, novembro de 2019.
- [64] Pinho C., Sebenta de Sistemas Térmicos FEUP.
- [65] Study Library, <https://studylibpt.com/doc/3489079/o-ciclo-da-bomba-de-calor>, consultado em março 2021.
- [66] Danfoss Engineering Tomorrow, <http://refrigerationandairconditioning.danfoss.com>, consultado em março 2021.
- [67] DGEG, ADENE “Cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios e componentes de edifícios”, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/pt_2018_cost-optimal_pt_version_hotels.pdf, consultado em fevereiro 2021.
- [68] S. Attia, et al., “Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe”, Energy and Buildings, vol. 155, pp. 439-458, 2017.
- [69] A. Figueiredo, J. Kämpf, R. Vicente “Passive house optimization for Portugal: Overheating evaluation and energy performance”, Energy and Buildings, vol.118 pp.181–196, 2016.
- [70] E. Cook, “The Flow of Energy in an Industrial Society”, Scientific American, vol.225 pp.135–144, 1971.
- [71] Matos Fernandes, “Intervenção final do Ministro do Ambiente e Ação Climática na Comissão de Ambiente, Energia e Ordenamento do Território”, 5 de maio de 2020.
- [72] ECOFYS, “Overview of Member States information on NZEBs”, Working version of the progress report - final report, 2014.
- [73] SCE, “Medidas de Melhoria (RECS)”, março 2020.
- [74] Programa de Eficiência Energética na Administração Pública “ECO.AP”, <https://www.ecoap.pt>.
- [75] BBC News, “As 10 cidades com maior crescimento económico em 2014”, BBC News, https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/02/150220_cidades_crescimento_economico_rb, consultado em abril 2020.
- [76] Miguel Prado, “Covid-19: Famílias ultrapassaram indústria no consumo de eletricidade”, Expresso, Maio 2020 <https://expresso.pt/coronavirus/2020-05-20-Covid-19-Familias-ultrapassaram-industria-no-consumo-de-eletricidade>, consultado em junho 2020.

- [77] Matteo Ciucci, “Eficiência Energética”, Fichas Temáticas sobre a União Europeia, Parlamento Europeu, novembro 2020
- [78] Edifícios e Energia, “Novidades no Programa ECO.AP: Calculadoras e Simulador de Desempenho Energético”, novembro 2019, <https://edificioseenergia.pt/noticias/eco-ap2511/>
- [79] Malatji M. E., Zhang J., Xia X. “A Multiple Objective Optimization Model for Building Energy Efficiency Investment Decision”, Energy and Buildings, vol.61, pp. 81-87, 2013.
- [80] Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de abril de 2006, Diário da República 1ª-A Série nº 67, pp. 2468 - 2513.

Anexo A - Cálculo da Inércia Térmica

A inércia térmica do edifício, tal como referido na secção 4.1.5, cuja forma de cálculo e terminologia vêm descritos no n.º 2 do anexo VII do RCCTE [46], é determinada recorrendo à seguinte expressão:

$$I_t = \frac{\sum_i M_{si} \times S_i \times r_i}{A_p} \quad (4.1)$$

em que:

M_{si} - Massa superficial do elemento i (kg/m^2);

r - Fator de redução da massa superficial útil, com valores entre 0 e 1;

S_i - Área de superfície interior do elemento i (m^2);

A_p - Área útil de pavimento (m^2).

Para o seu cálculo utilizou-se o software TRNSYS que permitiu determinar a área correspondente a cada um dos diferentes elementos construtivos, necessários para realizar o cálculo da inércia térmica.

A Tabela A.1 indica os valores determinados para as massas superficiais de cada um dos elementos construtivos, de acordo com os valores constantes nas tabelas da secção 4.1.3 (Tabela 4.4 à Tabela 4.9) que apresentam as componentes completas de cada um dos elementos construtivos. Note-se que não está representado o valor do piso interior, porque este é igual à cobertura interior, em que

ρ - Massa volúmica, (kg/m^3);

e - Espessura, (mm);

m_i - Massa superficial, (kg/m^2).

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

Elemento Construtivo	ρ (kg/m^3)	e (mm)	m_i (kg/m^2)
Parede Exterior	6801,225	350	2380,429
Piso exterior	2283	254	579,882
Cobertura exterior	6451,225	250	1612,806
Cobertura interior	2240	203,200	455,168
Parede interior	6640	340	2257,600

De acordo com o despacho 15793-K/2013 [46], 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 vários elementos construtivos em três grupos, EL1, EL2 e EL3 em que,

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

EL2 - Representa os elementos em contacto com o solo;

EL3 - Representa os elementos de compartimentação entre zonas climatizadas.

Neste caso, os elementos construtivos presentes no edifício foram divididos pelas três categorias do seguinte modo:

EL1 - Parede exterior e cobertura exterior;

EL2 - Piso exterior;

EL3 - Cobertura interior e parede interior.

Como o valor do fator de redução da massa superficial útil, r , varia consoante o valor da resistência térmica do revestimento superficial interior, com inserção da resistência térmica

de uma eventual caixa de ar associada, R , assumindo diferentes valores de acordo com o grupo a que o elemento construtivo pertence. Assim, para se determinar os valores correspondentes à M_{si} e r consideram-se as seguintes categorias.

▪ Elementos EL1

O despacho n.º 15793-K/2013 [46] indica que $M_{si} = m_{pi}$ para camadas sem isolamento térmico e quando existe caixa de ar, sendo m_{pi} a massa do elemento desde a caixa de ar até à face interior. O valor de M_{si} nunca pode ser superior a 150 kg/m^2 .

Quanto ao valor de r , atribui-se um valor de acordo com a resistência térmica do revestimento superficial interior associado R , resistência térmica de uma eventual caixa de ar associada, 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 a caixa de ar até à face interior, tal como indica o referido despacho.

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

Elemento Construtivo	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$e \text{ (mm)}$	$m_i \text{ (kg/m}^2\text{)}$	$M_{si} \text{ (kg/m}^2\text{)}$	r
Parede Exterior	3400	170	578	150	1
Cobertura exterior	4550	30	136,500	136,500	1

▪ Elementos EL2

Assim, pelo despacho n.º 15793-K/2013 [46], no caso de elementos em contacto com o solo, do tipo EL2 e elementos sem isolamento térmico, o valor de M_{si} , corresponderá a 150 kg/m^2 .

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

Elemento Construtivo	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$e \text{ (mm)}$	$M_{si} \text{ (kg/m}^2\text{)}$	r
Laje de pavimento	2240	203,200	150	1

▪ Elementos EL3

Para os elementos do tipo EL3, o despacho n.º 15793-K/2013 [46] indica que a $M_{si} = m_t$ onde m_t 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 kg/m^2 . Relativamente a r , o valor a adotar é o mesmo do considerado para os elementos do tipo EL1 e EL2, porque neste caso, os elementos do género EL3 não têm isolamento térmico.

Assim sendo, na Tabela A.3 encontram-se os novos valores de m_i , M_{si} , e r para os elementos construtivos que pertencem a esta categoria.

Tabela A.3 - Cálculo dos valores de m_i , M_{si} , r para os elementos EL3

Elemento Construtivo	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$e \text{ (mm)}$	$m_i \text{ (kg/m}^2\text{)}$	$M_{si} \text{ (kg/m}^2\text{)}$	r
Parede Interior	6640	340	2257,6	300	1
Cobertura Interior	2240	203,2	455,2	300	1

Determinação da inércia térmica, I_t

Para o cálculo do valor da inércia térmica do edifício, falta ainda determinar a área útil do edifício A_p . Na Tabela A.4 apresentam-se os dados necessários para o cálculo da inércia térmica do edifício, bem como o valor obtido.

Tabela A. 4 - Cálculo da inércia térmica I_t

Elemento construtivo	$M_{si} \text{ (kg/m}^2\text{)}$	$S_i \text{ (m}^2\text{)}$	r	$M_{si} \times S_i \times r$
Parede Exterior	150	3058,2	1	458730
Parede interior	150	1715,36	1	257304
Cobertura exterior	136,5	2427,62	1	331370
Pavimento interior	300	2427,62	1	728286
Laje de pavimento	300	2427,62	1	728286
Soma				25039,76
Área útil de pavimento, A_p				2332,63
Inércia térmica, I_t				1073,46

Anexo B - Zonas Térmicas

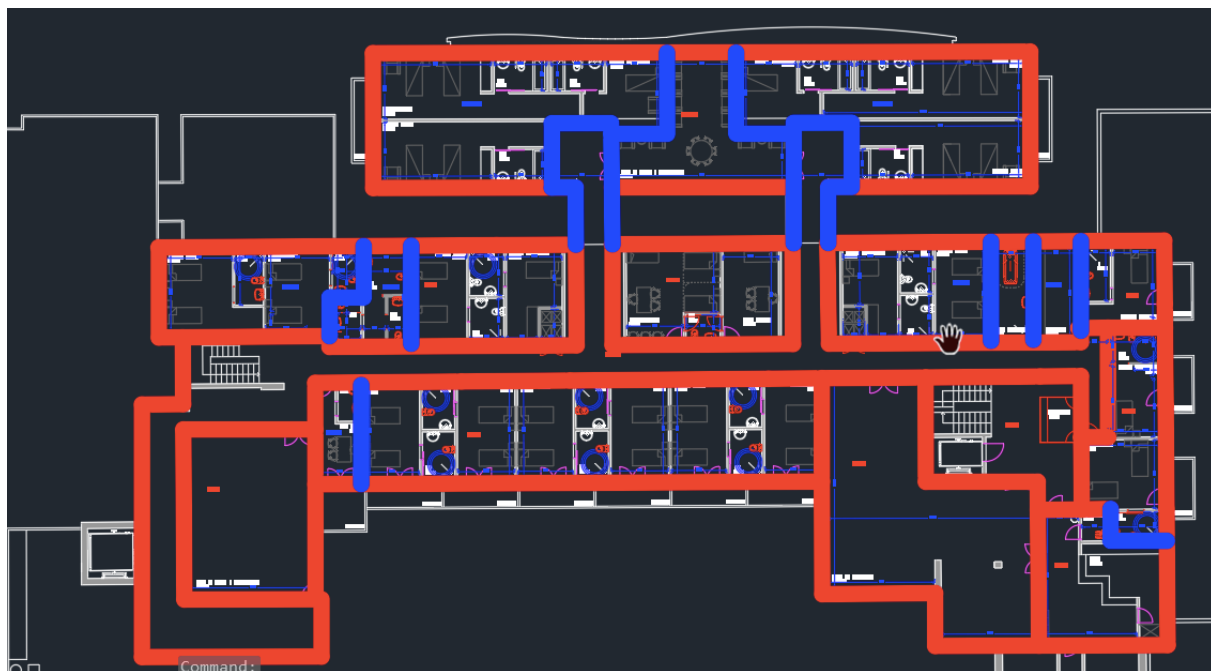


Figura B1 - Zonas térmicas

Anexo C - Características Técnicas dos Equipamentos

Neste anexo encontram-se as características técnicas dos equipamentos instalados no edifício, designadamente as caldeiras instaladas, de marca Vulcano e modelo Aquastar ZSC 35-3 MFA, com uma potência de 35 kW

Tabela C.1 - Caldeiras Vulcano Aquastar Modelo ZCS 35-3 MFA, potência 35 kW

Potência	Unidade	ZSC 24-3 MFA		ZSC 30-3 MFA		ZSC 35-3 MFA	
		Gás natural	G.P.L.	Gás natural	G.P.L.	Gás natural	G.P.L.
Potência nominal máxima	kW	24,0	24,0	30,0	30,0	34,9	34,9
Carga nominal máxima	kW	25,9	25,9	32,3	32,3	37,5	37,5
Potência útil mínima	kW	7,3	7,3	9,0	9,0	10,6	10,6
Carga nominal mínima	kW	8,1	8,1	10,0	10,0	11,7	11,7
Classe de rendimento		***	***	***	***	***	***
Consumo de gás							
Gás natural H ($H_{iS} = 9,5 \text{ kWh/m}^3$)	m ³ /h	2,7	-	3,4		3,9	-
Butano (G 30)/Propano (G 31) ($H_i = 12,9 \text{ kWh/kg}$)	kg/h	-	1,9	-	2,5	-	2,9
Pressão de alimentação de gás admissível							
Gás natural H	mbar	20	-	20	-	20	-
G.P.L. (Butano (G 30)/Propano (G 31))	mbar	-	28-30/37	-	28-30/37	-	28-30/37
Vaso de expansão							
Pressão de pré-carga	bar	0,5	0,5	0,5	0,5	0,75	0,75
Capacidade total	l	8	8	8	8	10,5	10,5
Valores dos gases queimados							
Temperatura dos gases queimados à carga nominal máxima	°C	127	127	130	132	132	135
Temperatura dos gases queimados à carga nominal mínima	°C	78	98	79	80	78	82
Caudal mássico à potência nominal máxima	g/s	14,3	17,4	18,0	19,2	20,4	22,0
Caudal mássico à potência nominal mínimo	g/s	14,3	15,1	16,9	17,2	18,2	20,1
CO ₂ à carga nominal máxima	%	6,8-7,6	6,3-6,8	6,8-7,4	7,2-7,8	7,0-7,8	7,2-7,8
CO ₂ à carga nominal mínima	%	1,9-2,3	2,0-2,6	2,0-2,5	2,2-2,8	2,1-2,7	2,2-2,8
Classe NO _x conforme EN 297		4	4	4	4	4	4

Anexo D - Rotinas do software TRNSYS

Tabela D.1- rotinas do software TRNSYS

componente	Descrição
Type 15-3	Leitor de dados climáticos em formato <i>EnergyPlus</i>
Type 65d	Componente de saída dos dados em formato gráfico
Type 25c	Componente de saída de dados em formato texto-aquecimento
Type 25c	Componente de saída de dados em formato texto-arrefecimento
Type 25c	Componente de saída de dados em formato texto-iluminação
Type 25c	Componente de saída de dados em formato texto-equipamentos
Type 9c	Componente de entrada de dados exteriores-aquecimento
Type 9c	Componente de entrada de dados exteriores-arrefecimento
Type 9c	Componente de entrada de dados exteriores-Iluminação
Type 9c	Componente de entrada de dados exteriores-infiltrações
Type 9c	Componente de entrada de dados exteriores-equipamentos
Type 9c	Componente de entrada de dados exteriores-Ocupação
Type 9c	Componente de entrada de dados exteriores-Temperatura do Solo

Anexo E - Resultado das Simulações

Cenário 1: Caldeira de condensação a gás natural para aquecimento

01/04/2021

Calculadora Climatização

...

Resumo - Resultados

Resultados	Aquecimento	
	Cenário Inicial	Cenário Final
Equipamento	Caldeira (gás natural)	Caldeira de condensação (gás natural)
Potência nominal	35 kW	35 kW
Rendimento	85%	110%
Fonte de energia	Gás Natural	Gás Natural
Consumo energético anual	691221 kWh	534125 kWh
Custos energéticos anuais	68925 €	53260 €

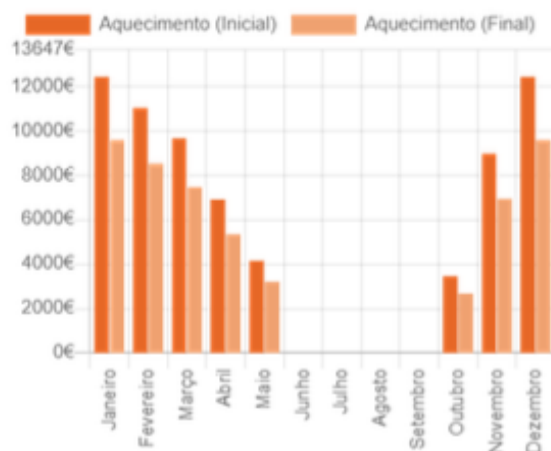
Resultados		
Redução anual do consumo de energia	157096 kWh	
Redução anual da fatura energética	15665 €	
	23%	
Custo energético unitário	0.1 €/kWh	0.1 €/kWh
Investimento estimado *	53520 €	
Período de retorno	3.4 anos	

	Resultados globais	
	Cenário Inicial	Cenário Final
Consumo total anual de energia do edifício	972678.83 kWh	815583 kWh
Consumo anual de energia para aquecimento	691221 kWh	534125 kWh
Rácio do consumo de energia para aquecimento relativamente ao consumo total de energia do edifício	71%	65%

O consumo de energia para climatização representa mais de 70% do consumo global de energia do edifício. Poderá ser conveniente rever os dados inseridos.

* O investimento estimado incorpora os custos com equipamentos/tecnologia, com depósitos e/ou acessórios e os respetivos custos de instalação.

Custos Energéticos



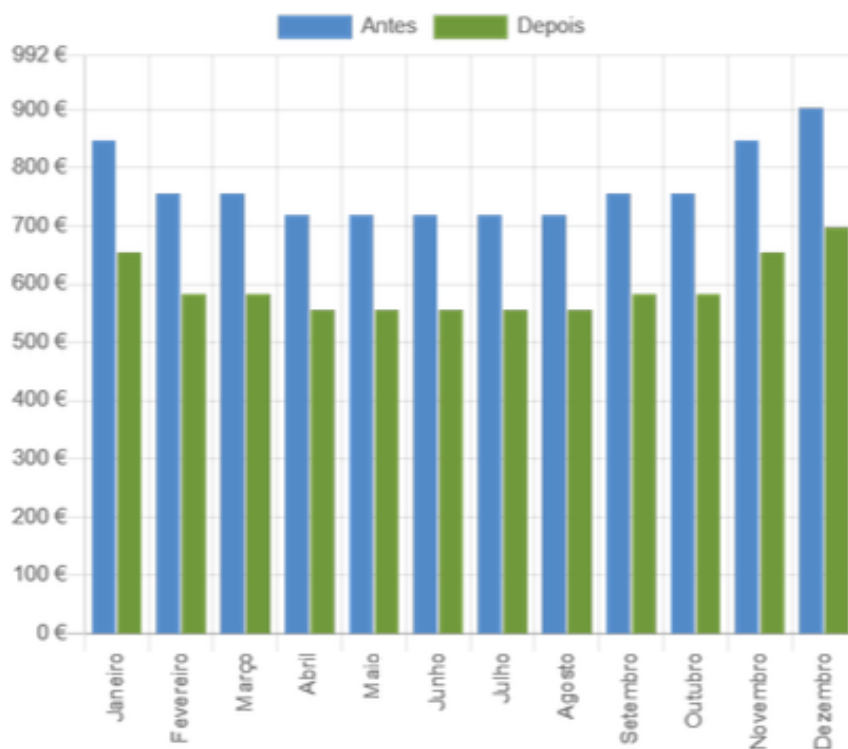
Cenário 2: Caldeira de condensação a gás natural para AQS

...

Resumo - Resultados

Consumos e custos energéticos (cenário inicial)	92459 kWh
	9245 €
Consumos e custos energéticos (cenário final - sistema de apoio)	71340 kWh
	7114 €
Redução anual da fatura energética	2111 €
	23%
Investimento estimado *	29422 €
Equipamento (tecnologia)	17168 €
Depósitos e acessórios	7350 €
Instalação	4904 €
Custos anuais com operação e manutenção	1471 €
Período de retorno	13.9 anos

Custos Energéticos



Cenário 3: Caldeira a biomassa para aquecimento

01/04/2021

Calculadora Climatização

...

Resumo - Resultados

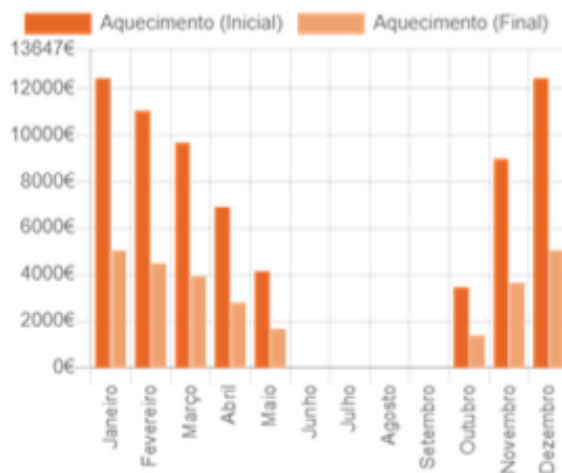
Resultados	Aquecimento	
	Cenário Inicial	Cenário Final
Equipamento	Caldeira (gás natural)	Caldeira (biomassa)
Potência nominal	35 kW	35 kW
Rendimento	85%	90%
Fonte de energia	Gás Natural	Biomassa
Consumo energético anual	691221 kWh	652820 kWh
Custos energéticos anuais	68925 €	27958 €

Resultados		
Redução anual do consumo de energia	38401 kWh	
Redução anual da fatura energética	40967 €	
	59%	
Custo energético unitário	0.1 €/kWh	0.04 €/kWh
Investimento estimado *	53520 €	
Período de retorno	1.3 anos	

	Cenário Inicial	Cenário Final
Consumo total anual de energia do edifício	972678.83 kWh	934278 kWh
Consumo anual de energia para aquecimento	691221 kWh	652820 kWh
Rácio do consumo de energia para aquecimento relativamente ao consumo total de energia do edifício	71%	70%

O consumo de energia para climatização representa mais de 70% do consumo global de energia do edifício. Poderá ser conveniente rever os dados inseridos.

* O investimento estimado incorpora os custos com equipamentos/tecnologia, com depósitos e/ou acessórios e os respetivos custos de instalação.

Custos Energéticos

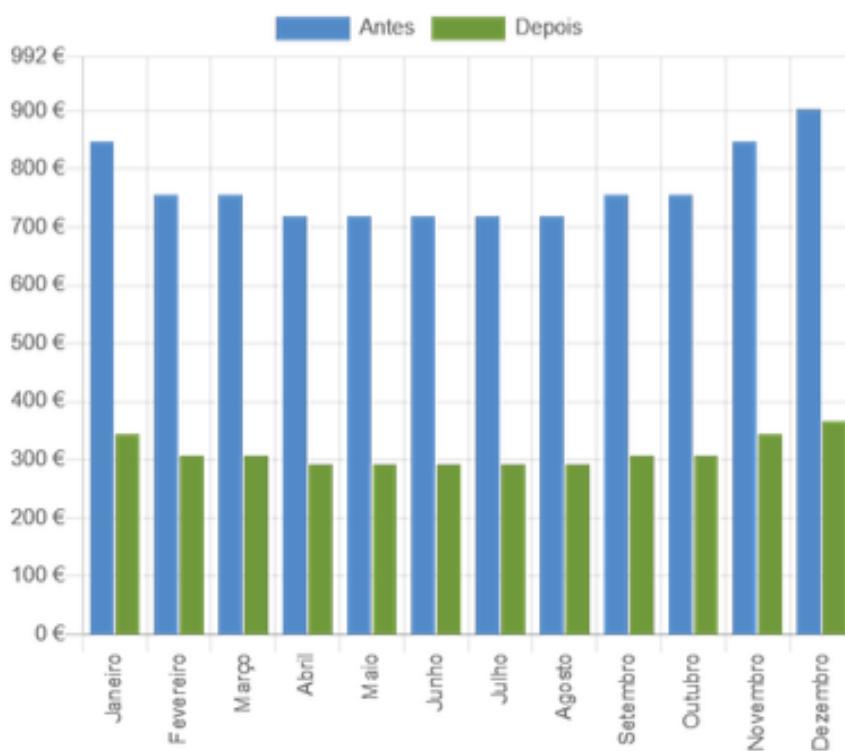
Cenário 4: Caldeira a biomassa para AQS

...

Resumo - Resultados

Consumos e custos energéticos (cenário inicial)	92459 kWh
	9245 €
Consumos e custos energéticos (cenário final - sistema de apoio)	87193 kWh
	3734 €
Redução anual da fatura energética	5758 €
	62%
Investimento estimado *	39722 €
Equipamento (tecnologia)	25752 €
Depósitos e acessórios	7350 €
Instalação	6620 €
Custos anuais com operação e manutenção	1986 €
Período de retorno	6.8 anos

Custos Energéticos



Cenário 5: Bomba de calor para aquecimento

01/04/2021

Calculadora Climatização

...

Resumo - Resultados

Resultados	Aquecimento	
	Cenário Inicial	Cenário Final
Equipamento	Caldeira (gás natural)	Chiller Bomba de calor (aquecimento)
Potência nominal	35 kW	35 kW
Rendimento	85%	360%
Fonte de energia	Gás Natural	Energia Elétrica
Consumo energético anual	691221 kWh	163205 kWh
Custos energéticos anuais	68925 €	32641 €

Resultados

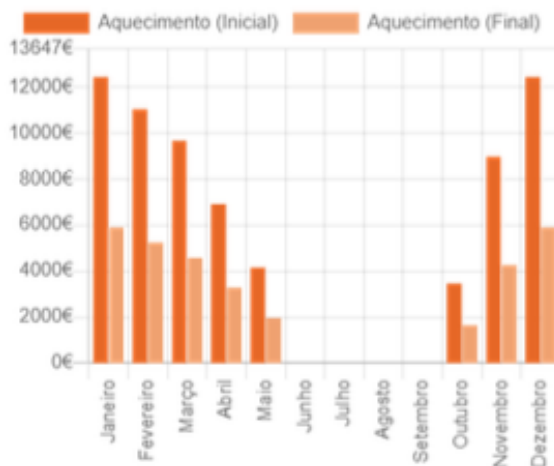
Redução anual do consumo de energia	528016 kWh	
Redução anual da fatura energética	36284 €	
	53%	
Custo energético unitário	0.1 €/kWh	0.2 €/kWh
Investimento estimado *	40140 €	
Período de retorno	1.1 anos	

Resultados globais

	Cenário Inicial	Cenário Final
Consumo total anual de energia do edifício	972678.83 kWh	444663 kWh
Consumo anual de energia para aquecimento	691221 kWh	163205 kWh
Rácio do consumo de energia para aquecimento relativamente ao consumo total de energia do edifício	71%	37%

O consumo de energia para climatização representa mais de 70% do consumo global de energia do edifício. Poderá ser conveniente rever os dados inseridos.

* O investimento estimado incorpora os custos com equipamentos/tecnologia, com depósitos e/ou acessórios e os respetivos custos de instalação.

Custos Energéticos

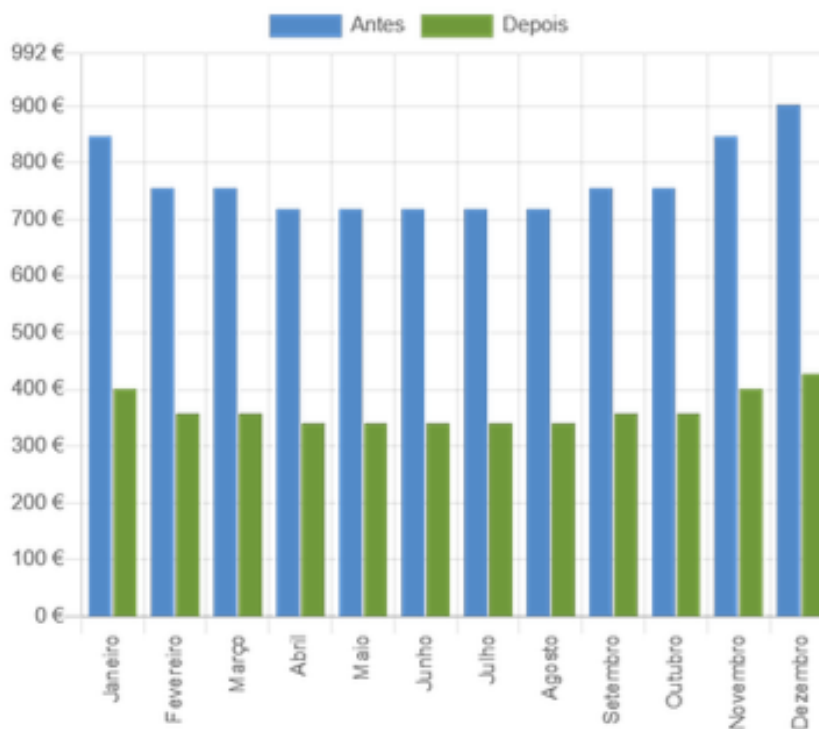
Cenário 6: Bomba de calor para AQS

...

Resumo - Resultados

Consumos e custos energéticos (cenário inicial)	92459 kWh
	9245 €
Consumos e custos energéticos (cenário final - sistema de apoio)	21798 kWh
	4360 €
Redução anual da fatura energética	4886 €
	53%
Investimento estimado *	33836 €
Equipamento (tecnologia)	20847 €
Depósitos e acessórios	7350 €
Instalação	5639 €
Custos anuais com operação e manutenção	1692 €
Período de retorno	6.9 anos

Custos Energéticos



Cenário 7: Painéis solares térmicos

...

Resumo - Resultados

N.º de coletores solares	38
Área ocupada pelo solar térmico	85.5 m2
Volume dos depósitos de acumulação	5600 litros
Necessidades energéticas anuais	92459 kWh
Energia produzida pelo solar térmico	54136 kWh
Consumo de energia (sistema de apoio)	45146 kWh
Excedente de energia (no verão)	16%
Contributo do solar térmico	59%

Análise Financeira

Custos energéticos (cenário inicial - sem solar térmico)	9245 €
Custos energéticos (cenário final - com solar térmico)	4515 €
Redução anual da fatura energética	4730 €
Investimento estimado *	40680 €
Coletores	17100 €
Depósitos e acessórios	16800 €
Instalação	6780 €
Custos anuais com operação e manutenção	2034 €
Período de retorno	8.6 anos

* O investimento estimado incorpora os custos com os coletores solares, com depósitos e/ou acessórios e os respetivos custos de instalação.

OBS: requer projeto de execução (Portaria 701-H/2008) e sistema de monitorização com registo de produção.

Cenário 8: Painéis fotovoltaicos

11/04/2021

Calculadora Solar Fotovoltaico

...

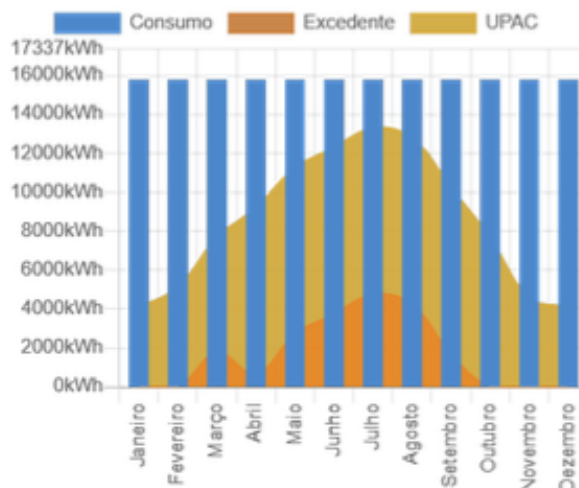
Resumo - Resultados**UPAC**

Potência do solar fotovoltaico	70 kW
N.º de painéis fotovoltaicos	253
Área ocupada pelo solar fotovoltaico	538 m ²
Observações	Potência da central otimizada pelo consumo e perfil de carga da instalação
Consumo de energia do edifício	189131 kWh
Produção de energia solar	102362 kWh
Energia excedentária	19638 kWh
Energia excedentária (%)	19 %
Autoconsumo	82724 kWh
Consumo de energia renovável	44%
Custos energéticos anuais	3783 €
Receita anual com fotovoltaico	17413 €
Redução anual da fatura energética	46%
Investimento estimado *	69634 €
Custos anuais com operação e manutenção	1393 €
Período de retorno	4.0 anos

* O investimento estimado incorpora os custos com os módulos solares, com inversor(es) e os respetivos custos de instalação.

NOTA 1: Estes valores são obtidos para módulos solares virados a Sul, com 35° de inclinação (condições ideais) e a potência da central corresponde à potência nominal, sendo equivalente a potência de ligação.

NOTA 2: No âmbito do POSEUR apenas são elegíveis investimentos em UPAC e desde que façam parte de soluções integradas que visem a eficiência energética do edifício. Apenas a UPAC é susceptível de alteração da classe energética do edifício.

Balanco Energético (kWh)

Cenário 9: Edifício nZEB com bomba de calor---
Resumo - Resultados

Resultados	Aquecimento		AQS	
	Cenário Inicial	Cenário Final	Cenário Inicial	Cenário Final
Equipamento	Caldeira (gás natural)	Chiller Bomba de calor (aquecimento)	-	-
Potência nominal	70 kW	70 kW	-	-
Rendimento	85%	360%	-	-
Fonte de energia	Gás Natural	Energia Elétrica	-	-
Consumo energético anual	691221 kWh	163205 kWh	92459 kWh	25682 kWh
Custos energéticos anuais	68925 €	32641 €	9245 €	5136 €
Resultados				
Redução anual do consumo d energia	528016 kWh		66771 kWh	
Redução anual da fatura energética	36284 €		4083 €	
	53%		44%	
Custo energético unitário	0.1 €/kWh	0.2 €/kWh	0.1 €/kWh	0.2 €/kWh
Investimento estimado *	40050 €		0 €	
Período de retorno	1.1 anos		0.0 anos	
Resultados globais				
			Cenário Inicial	Cenário Final
Consumo total anual de energia do edifício			830678.72 kWh	235892 kWh
Consumo anual de energia para aquecimento e AQS			783674 kWh	188887 kWh
Rácio do consumo de energia para aquecimento e AQS relativamente ao consumo total de energia do edifício			94%	80%
Custos energéticos anuais			78144 €	37777 €
Redução anual do consumo de energia			594787 kWh	
Redução anual da fatura energética			40367 €	
			52%	
Custo energético unitário			0.1 €/kWh	0.2 €/kWh
Investimento estimado *			40050 €	
Período de retorno			1.0 anos	

O consumo de energia para climatização e AQS representa mais de 70% do consumo global de energia do edifício. Poderá ser conveniente rever os dados inseridos.

* O investimento estimado incorpora os custos com equipamentos/tecnologia, com depósitos e/ou acessórios e os respetivos custos de instalação.

Cenário 10: Edifício nZEB com painéis solares térmicos

...

Resumo - Resultados

N.º de coletores solares	11
Área ocupada pelo solar térmico	24.8 m ²
Volume dos depósitos de acumulação	1600 litros
Necessidades energéticas anuais	25682 kWh
Energia produzida pelo solar térmico	15448 kWh
Consumo de energia (sistema de apoio)	12058 kWh
Excedente de energia (no verão)	20%
Contributo do solar térmico	60%

Análise Financeira

Custos energéticos (cenário inicial - sem solar térmico)	3015 €
Custos energéticos (cenário final - com solar térmico)	1202 €
Redução anual da fatura energética	1812 €
Investimento estimado *	13620 €
Coletores	4950 €
Depósitos e acessórios	6400 €
Instalação	2270 €
Custos anuais com operação e manutenção	681 €
Período de retorno	7.5 anos

* O investimento estimado incorpora os custos com os coletores solares, com depósitos e/ou acessórios e os respetivos custos de instalação.

OBS: requer projeto de execução (Portaria 701-H/2008) e sistema de monitorização com registo de produção.

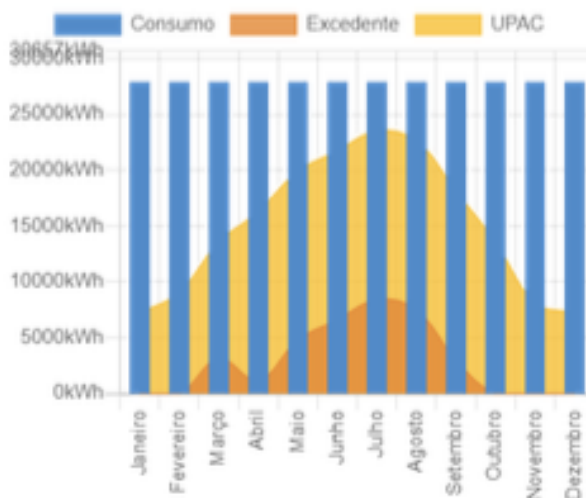
Cenário 11: Edifício nZEB com painéis solares fotovoltaicos...
Resumo - Resultados**UPAC**

Potência do solar fotovoltaico	123 kW
N.º de painéis fotovoltaicos	448
Área ocupada pelo solar fotovoltaico	951 m ²
Observações	Potência da central otimizada pelo consumo e perfil de carga da instalação
Consumo de energia do edifício	334440 kWh
Produção de energia solar	181006 kWh
Energia excedentária	34726 kWh
Energia excedentária (%)	19 %
Autoconsumo	146280 kWh
Consumo de energia renovável	44%
Custos energéticos anuais	33778 €
Receita anual com fotovoltaico	16163 €
Redução anual da fatura energética	48%
Investimento estimado *	110820 €
Custos anuais com operação e manutenção	2216 €
Período de retorno	6.9 anos

* O investimento estimado incorpora os custos com os módulos solares, com inversor(es) e os respetivos custos de instalação.

NOTA 1: Estes valores são obtidos para módulos solares virados a Sul, com 35° de inclinação (condições ideais) e a potência da central corresponde à potência nominal, sendo equivalente a potência de ligação.

NOTA 2: No âmbito do POSEUR apenas são elegíveis investimentos em UPAC e desde que façam parte de soluções integradas que visem a eficiência energética do edifício. Apenas a UPAC é susceptível de alteração da classe energética do edifício.

Balço Energético (kWh)

Anexo F - Resultados dos Fluxos de Caixa Descontados

O método dos fluxos de caixa a 25 anos

Método Dinâmico : CASH-FLOW														
ANO	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Manutenção equipamentos antigos		13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000
Apóio ao abrigo de casa eficiente 2020		8500												
Poupança energética anual		88 388,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €
Custos														
Sistema de arrefecimento	40 140,00 €													
Substituição por Bomba de calor AQS	40 050,00 €													
Investimento Solar Térmico	13 620,00 €													
Investimento com o Fotovoltaico	110 820,00 €													
Custo com Envolvente exterior	361 730,10 €													
Custo com implementação LED	3 565,80 €													
Substituição por Bomba de calor aquecimento	40 140,00 €													
Custos Administrativos e licenças(3%)	18 301,98 €													
Custos de projeto e fiscalização (6%)	30 503,30 €													
Encargos Financeiros (5%)	25 134,72 €													
Manutenção novos equipamentos		1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €
Total de Custos	684 005,89 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €
Cash-Flow	- 684 005,89 €	86 419,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €
Receita Líquida Final	- 684 005,89 €	86 419,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €
VAL														
Taxa de Atualização														
TIR														

2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046
13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000	13000
79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €	79 888,00 €
1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €
1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €	1 968,81 €
77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €
77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €	77 919,19 €

Figura F1 - imagem do Excel do método dos fluxos de caixa descontados

Anexo G - Modelo de otimização (*Solver*)

Apresentam-se imagens da folha de Excel referente à normalização dos custos de redução energética, RNi, e do período de retorno PRNi, associado a cada uma das medidas de melhoria

		Max	Min	Max	Min
Medida	Investimento (€)	Redução (€)	PRS (anos)	Rni	PRNi
MM1.1	48752	7 895,15 €	6,2	0,2	0,2
MM1.2	108000	28 569,10 €	3,8	0,6	0,3
MM1.3	135000	10 107,26 €	13,4	0,2	0,1
MM1.4	69978	16 873,24 €	4,1	0,3	0,2
MM1	361730	10 637,10 €	34,0	0,2	0,0
MM2	3565,8	3 711,80 €	1,0	0,1	1,0
MM3.1	82942	17 821,05 €	4,7	0,4	0,2
MM3.1H	53520	15 710,10 €	3,4	0,3	0,3
MM3.1AQ5	29422	2 111,90 €	14,0	0,0	0,1
MM3.2	93242	48 767,30 €	1,9	1,0	0,5
MM3.2H	53520	43 009,80 €	1,2	0,9	0,8
MM3.2AQ5	39722	5 758,00 €	6,8	0,1	0,1
MM3.3	73976	41 354,20 €	1,8	0,8	0,5
MM3.3H	40140	36 481,60 €	1,1	0,7	0,9
MM3.3AQ5	33836	4 886,30 €	6,9	0,1	0,1
MM4.1	40680	4 730,00 €	8,6	0,1	0,1
MM4.2	69634	17 413,00 €	4,0	0,4	0,2
	Máximo	48 767,30 €	34,0		
	Mínimo	2 111,90 €	1,0		

Figura G1 - Imagem do Excel da normalização dos custos de redução energética e período retorno

O modelo do problema de otimização usado para resolução no Solver, respetivamente com a função objetivo e respetivas restrições.

Medidas	VD		α_1	α_2			
MM1.1	0		1	0		FO	92703,6953
MM1.2	1						
MM1.3	0	Restrições					
MM1.4	0	(6.7)		234719,8	<=	250000	
MM1	0	(6.8) (j=1)		0	<=	1	
MM2	1	(6.8) (j=2)		1	<=	1	
MM3.1	0	(6.8) (j=3)		0	<=	1	
MM3.1H	0	(6.8) (j=4)		0	<=	1	
MM3.1AQS	0	(6.9)		0	<=	1	
MM3.2	0	(6.10)		1	<=	1	
MM3.2H	1	(6.11)		0	<=	1	
MM3.2AQS	0						
MM3.3	0						
MM3.3H	0						
MM3.3AQS	0						
MM4.1	0						
MM4.2	1						

Solver Parameters

Set Objective: \$Q\$4

To: ☒ Max ☐ Min ☐ Value Of: 0

By Changing Variable Cells: \$K\$4:\$K\$20

Subject to the Constraints:

\$K\$4:\$K\$20 = binary

\$N\$7:\$N\$14 <= \$P\$7:\$P\$14

☒ Make Unconstrained Variables Non-Negative

Select a Solving Method: Simplex LP

Solving Method

Select the GRG Nonlinear engine for Solver Problems that are smooth nonlinear. Select the LP Simplex engine for linear Solver Problems, and select the Evolutionary engine for Solver problems that are non-smooth.

Close Solve

Figura G2 - Imagem do Excel do problema de otimização e Solver.