



Flávia Daniela Faria de Sousa

Avaliação dos benefícios de
ciclo de vida resultantes da integração
de sistemas solares nos edifícios

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Flávia Daniela Faria de Sousa

Avaliação dos benefícios de
ciclo de vida resultantes da integração
de sistemas solares nos edifícios

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

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

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho é o culminar do meu percurso académico, que apesar de trabalhoso, proporcionou-me experiências magníficas e inesquecíveis. Como tal, gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos:

Ao Professor Doutor Ricardo Mateus, pela orientação, disponibilidade e vasta compreensão, e também pela motivação e partilha de conhecimento que contribuíram para a execução deste trabalho.

À Professora Doutora Sandra Monteiro da Silva, pela disponibilidade e pela facultação dos dados necessários à elaboração do trabalho.

Aos meus pais, por todo o apoio que me deram ao longo deste percurso, pelo amor, paciência e por me proporcionarem as condições para a minha formação. A toda a minha família, por sempre me acompanharem e incentivarem a lutar pelos meus objetivos.

Ao meu grupo de amigas, por todas as partilhas e experiências vividas nos últimos anos, que a vida permita que esta amizade se mantenha e continuemos a crescer juntas.

Aos meus amigos, pela amizade, compreensão, pelas vezes que foram desencaminhadores, pelas celebrações constantes da amizade que nos une e por me apoiarem sempre.

Ao Daniel, pelo apoio incondicional, pela paciência demonstrada nos momentos mais difíceis, pelo amor e carinho, por teres sempre um sorriso enorme para mostrar e por me fazeres feliz.

À Célia, por toda a ajuda e companheirismo ao longo da realização desta dissertação.

Ao Professor Doutor Dinis Leitão, pelo apoio, pela disponibilidade para esclarecimento de dúvidas e por todas as sugestões pertinentes para a melhoria deste trabalho.

A toda a equipa de docentes do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho que contribuíram para a minha formação profissional.

RESUMO

O consumo energético desmedido a nível global obriga a uma maior utilização dos recursos naturais, sendo os combustíveis fósseis a principal fonte energética. Esta realidade tem contribuído para o fenómeno das alterações climáticas, acelerando o aquecimento global a um ritmo elevado.

O setor dos edifícios representa um grande potencial de diminuição dos consumos energéticos, uma vez que atualmente existem tecnologias e medidas que podem ser aplicadas de forma a alcançar edifícios com necessidades quase nulas de energia. As metas da União Europeia passam por diminuir o consumo de energia e diminuir a produção de energia com base em combustíveis fósseis, de forma a reduzir a emissão de gases poluentes.

Atendendo a esta realidade, esta dissertação teve como alvo de estudo a avaliação do custo-benefício ambiental e económico da reabilitação de um edifício, que representa os edifícios construídos em Portugal no período compreendido entre 1961 e 1990, onde foram considerados cenários de reabilitação com diferentes níveis de eficiência energética.

Através dos diferentes cenários de estudo considerados, será possível analisar a influência que as medidas de reabilitação, como por exemplo a utilização de sistemas solares, apresentam sobre o desempenho ambiental do ciclo de vida útil do edifício.

Uma análise de ciclo de vida dos diferentes cenários permite concluir que um investimento na reabilitação de um edifício que vise o aumento do seu desempenho energético e a introdução de sistemas solares irá reduzir significativamente o impacto ambiental do edifício, assim como os custos de ciclo de vida.

Palavras-Chave: Custo-benefício, Desempenho energético, Avaliação de ciclo de vida, Impacte ambiental, Sistemas Solares.

ABSTRACT

Global energy consumption requires a greater use of natural resources, with fossil fuels being the main energy source. This reality has contributed to the phenomenon of climate change, accelerating global warming dramatically.

The building sector has an enormous potential for reducing energy consumption, as there are currently technologies and measures that can be applied in order to reach buildings with almost zero energy needs. The European Union's goals are to reduce energy consumption and reduce energy production based on fossil fuels so that the emission of gaseous pollutants decreases too.

Attending to this reality, this dissertation aims to study the environmental and economic cost-benefit resulting from the energy retrofitting of a case study building. The case study building represents the family buildings built in Portugal in the period bounded between 1961 and 1990. In this study, different rehabilitation scenarios with different levels of energy efficiency were considered.

Through the different study scenarios considered, it was possible to analyse the influence of different energy retrofitting measures, such as the use of solar systems, have on the environment over the life cycle of the building.

A life cycle analysis of the different scenarios allows to conclude that an investment in solar systems will significantly decrease the environmental impact of the building as well as its life cycle costs.

Keywords: Cost–benefit analysis, Energy performance, Life-cycle analysis, Environmental impact, Solar systems.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| Agradecimentos | iii |
| Resumo | v |
| Abstract..... | vii |
| Índice | ix |
| Lista de Figuras | xiii |
| Lista de Tabelas | xv |
| Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos | xvii |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1 Enquadramento | 1 |
| 1.2 Objetivos | 4 |
| 1.3 Organização da dissertação..... | 5 |
| 2. Levantamento do estado da arte | 7 |
| 2.1 Análise do parque habitacional português | 7 |
| 2.1.1 Caracterização dos edifícios em Portugal..... | 8 |
| 2.1.2 Análise dos edifícios construídos entre 1961 e 1990. | 9 |
| 2.1.3 Importância da reabilitação no contexto dos edifícios construídos entre 1961 e 1990. 11 | |
| 2.2 Desempenho energético nos edifícios de habitação. | 12 |
| 2.2.1 Consumo energético nos edifícios de habitação..... | 12 |
| 2.2.2 Fatores determinantes para a eficiência energética de um edifício | 14 |
| 2.2.3 Políticas Energéticas – Enquadramento legal..... | 15 |
| 2.2.4 Edifícios ZEB e nZEB | 17 |
| 2.3 Energia Solar..... | 18 |
| 2.3.1 Sistemas solares térmicos | 19 |
| 2.3.2 Sistemas solares fotovoltaicos | 21 |
| 3. Metodologias de investigação | 23 |
| 3.1 Enquadramento | 23 |
| 3.2 Análise das necessidades energéticas | 26 |
| 3.2.1 Características térmicas da envolvente..... | 27 |
| 3.2.2 Ventilação e Sistemas técnicos..... | 29 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.3 | Balanço energético | 30 |
| 3.3 | Análise do desempenho ambiental de ciclo de vida..... | 31 |
| 3.3.1 | Definição do objetivo e do âmbito | 33 |
| 3.3.2 | Inventário de ciclo de vida | 34 |
| 3.3.3 | Análise dos Impactes de Ciclo de Vida | 36 |
| 3.4 | Análise económica de ciclo de vida | 38 |
| 4. | Caso de estudo | 43 |
| 4.1 | Apresentação do caso de estudo | 43 |
| 4.2 | Caracterização do edifício | 45 |
| 4.3 | Apresentação das medidas de melhoria de cada cenário de reabilitação | 47 |
| 4.3.1 | Soluções construtivas | 48 |
| 4.3.2 | Equipamentos técnicos..... | 50 |
| 4.3.3 | Propriedades do edifício em estudo antes e após as reabilitações | 53 |
| 5. | Apresentação e discussão de resultados | 55 |
| 5.1 | Resultados do Desempenho energético de ciclo de vida..... | 55 |
| 5.2 | Resultados do Desempenho ambiental de ciclo de vida..... | 59 |
| 5.2.1 | Impactes ambientais de ciclo de vida..... | 59 |
| 5.2.2 | Tempo de retorno das emissões de carbono (GPBT)..... | 65 |
| 5.2.3 | Tempo de retorno energético (EPBT)..... | 68 |
| 5.3 | Resultados do Desempenho económico de ciclo de vida..... | 70 |
| 5.4 | Resultados para diferentes zonas climáticas | 73 |
| 5.4.1 | Desempenho energético | 74 |
| 5.4.2 | Desempenho ambiental | 76 |
| 5.4.3 | Desempenho económico | 78 |
| 6. | Conclusões e desenvolvimentos futuros..... | 81 |
| 6.1 | Conclusões..... | 81 |
| 6.2 | Desenvolvimentos Futuros | 84 |
| | Bibliografia | 86 |
| | Anexo I – Emissões de CO ₂ e CED _{TOT} associados aos sistemas solares | 91 |
| | Anexo II – Custos detalhados de investimento e manutenção de cada cenário estudado..... | 93 |

| | |
|--|-----|
| Anexo III – Custos anuais de cada cenário estudado. | 95 |
| Anexo IV – Resultados do desempenho ambiental para as zonas climáticas de Vila Real e Beja. | 99 |
| Anexo V – Custos de ciclo de vida acumulados de cada cenário estudado. | 101 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Estrutura da dissertação..... | 6 |
| Figura 2.1 - Número de edifícios clássicos segundo a época de construção do edifício | 8 |
| Figura 2.2 - Número de edifícios clássicos existentes em 2011 segundo o número de alojamentos..... | 9 |
| Figura 2.3 - Distribuição de edifícios clássicos segundo o tipo de estrutura de construção, por época de construção..... | 10 |
| Figura 2.4 - Distribuição de edifícios clássicos segundo o tipo de revestimento exterior das paredes, por época de construção | 10 |
| Figura 2.5 - Número de edifícios clássicos muito degradados ou com necessidade de grandes reparações segundo a época de construção do edifício | 11 |
| Figura 2.6 - Balanço energético do ano 2015 do setor doméstico..... | 13 |
| Figura 2.7 - Repartição dos consumos de eletricidade pelos diferentes usos finais | 14 |
| Figura 2.8 - Conceito ZEB | 18 |
| Figura 2.9 - Representação esquemática de um sistema solar térmico em termosifão..... | 20 |
| Figura 2.10 - Representação esquemática de um sistema solar térmico de circulação forçada..... | 20 |
| Figura 3.1 - Variação dos ganhos de calor no verão e das perdas de calor no inverno consoante o nível de isolamento do edifício..... | 26 |
| Figura 3.2 - Requisitos energéticos para edifícios sujeitos a grandes intervenções em função da época de construção do edifício..... | 31 |
| Figura 3.3 – Estrutura da Análise de Ciclo de Vida | 32 |
| Figura 3.4 - Entradas e saídas na fronteira física do sistema em análise..... | 35 |
| Figura 3.5- Categorização dos custos admitidos na análise económica de cada cenário | 38 |
| Figura 5.1 - Potencial de melhoria de desempenho ambiental (Eli) de cada cenário de renovação..... | 64 |
| Figura 5.2 – Potencial de aquecimento global acumulado de cada cenário durante o ciclo de vida considerado | 66 |
| Figura 5.3 - Potencial de Aquecimento Global acumulado de cada sistema solar utilizado no caso de estudo..... | 67 |
| Figura 5.4 - Energia incorporada acumulada de cada cenário durante o ciclo de vida considerado..... | 69 |
| Figura 5.5 - Energia incorporada acumulada de cada sistema solar utilizado no caso de estudo | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.6 – Custos de ciclo de vida acumulados de cada cenário de reabilitação..... | 72 |
| Figura 5.7 - Custos de ciclo de vida acumulados de cada cenário de reabilitação (situação adicional)..... | 73 |
| Figura 5.8 - Potencial de melhoria ambiental de cada cenário de reabilitação, para as diferentes zonas climáticas..... | 76 |
| Figura 5.9 – Custos globais de cada cenário de reabilitação para diferentes zonas climáticas. | 79 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Medidas de reabilitação aplicadas a cada cenário em estudo. | 25 |
| Tabela 3.2 - Procedimento adotado para definir as alterações realizadas em cada elemento construtivo de forma a cumprirem os requisitos mínimos impostos pelo REH. | 28 |
| Tabela 3.3 – Categorias de impacte consideradas e métodos utilizados na ACV. | 36 |
| Tabela 3.4 - Peso atribuído a cada indicador de impacte ambiental. | 37 |
| Tabela 4.1 - Levantamento dimensional do edifício em estudo. | 44 |
| Tabela 4.2 - Caracterização do edifício em estudo. | 46 |
| Tabela 4.3 – Intervenções realizadas em cada cenário de reabilitação. | 47 |
| Tabela 4.4 - Equipamentos técnicos aplicados à renovação Base. | 50 |
| Tabela 4.5 - Resultados da simulação de desempenho do sistema solar térmico: requisitos mínimos do REH. | 51 |
| Tabela 4.6 - Equipamentos técnicos aplicados à renovação nZEB e ZEB. | 51 |
| Tabela 4.7 - Resultados da simulação de desempenho do sistema solar térmico de tubos de vácuo. | 52 |
| Tabela 4.8 - Resultados da simulação do sistema solar fotovoltaico. | 53 |
| Tabela 4.9 - Propriedades do edifício antes e após a reabilitação. | 54 |
| Tabela 4.10 - Características dos vãos envidraçados. | 54 |
| Tabela 5.1 – Consumo de energia anual de cada equipamento técnico. | 56 |
| Tabela 5.2 - Energia produzida a partir de fontes renováveis. | 56 |
| Tabela 5.3 -Balanço energético de cada cenário. | 57 |
| Tabela 5.4 – Relação entre as necessidades nominais e limite do edifício em estudo. | 59 |
| Tabela 5.5 - Inventário de ciclo de vida para cada cenário. | 60 |
| Tabela 5.6 - Impactes ambientais anuais de ciclo de vida e potenciais de melhoria ambiental de cada indicador. | 63 |
| Tabela 5.7 - Estimativa dos custos associados a cada cenário de estudo (€). | 71 |
| Tabela 5.8 – Energia produzida a partir de fontes renováveis pelo edifício localizado em Vila Real. | 74 |
| Tabela 5.9 - Energia produzida a partir de fontes renováveis pelo edifício localizado em Beja. | 74 |
| Tabela 5.10 – Balanço energético de cada cenário do edifício localizado em Vila Real. | 75 |

| | |
|---|----|
| Tabela 5.11 - Balanço energético de cada cenário do edifício localizado em Beja..... | 75 |
| Tabela 5.12 - GPBT e EPBT de cada cenário por zona climática. | 77 |
| Tabela 5.13 – GPBT e EPBT dos sistemas solares para um período de 20 anos. | 78 |
| Tabela 5.14 - Estimativa dos custos associados a cada cenário de estudo para a região climática de Vila Real (€). | 78 |
| Tabela 5.15 - Estimativa dos custos associados a cada cenário de estudo para a região climática de Beja (€). | 79 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

Abreviaturas

€ - Euro

CO₂ – Dióxido de Carbono

E_{ren} – Energia proveniente de fontes renováveis

E_{ren,ext} – Energia exportada proveniente de fontes renováveis

K – Kelvin

Kg – Quilograma

kWh – Quilowatt-hora

m – Metro

MJ – Megajoule

N_{ic} – Necessidades nominais de aquecimento

N_{tc} – Necessidades nominais globais de energia primária

N_{vc} – Necessidades nominais de arrefecimento

°C – Graus Celsius

Rph – Renovações por hora

U – Coeficiente de transmissão térmica

U_{máx} – Coeficiente de transmissão térmica máximo

W – Watts

Siglas e Acrónimos

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

ADENE – Agência nacional de Energia

AICV – Avaliação do Impacte de Ciclo de Vida

APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis

AQS – Água Quente Sanitária

CUR – Comercializadores de Último Recurso

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

DL – Decreto-Lei

Eli – Potencial de melhoria de desempenho ambiental

ENU – Espaço não útil

EPA – Agência Norte-Americana para a Proteção Ambiental
EPBT – Energy payback time
ETICS – External Thermal Insulation Composite System
GEE – Gases de efeito de estufa
GPBT – Greenhouse gas payback time
ICV – Inventário de Ciclo de Vida
INE – Instituto Nacional de Estatística
INE – Instituto Nacional de Estatística
ITEconst – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção
IVA – Imposto de Valor Acrescentado
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NZEB – Nearly Zero Energy Buildings
PV – Sistema fotovoltaico
PVC – Policloreto de vinilo
REH – Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação
RESP – Rede Elétrica de Serviço Público
SCE – Sistema de Certificação Energética
SST – Sistema Solar Térmico
UE – União Europeia
VAL – Valor Atualizado Líquido
XPS – Poliestireno Expandido Extrudido
ZEB – Zero Energy Buildings

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Os edifícios são responsáveis por cerca de 40% do consumo total de energia e 36% de emissões de CO₂ da União Europeia (União Europeia, 2010a). As previsões indicam que estes valores tendem a aumentar à proporção do desenvolvimento das sociedades, fazendo crescer a preocupação ambiental relacionada com o consumo energético.

As últimas décadas foram marcadas pela aceleração do aquecimento global, causado pelas emissões de gases de efeito de estufa, como o dióxido de carbono, o metano, o óxido nítrico e os clorofluorcarbonetos, cuja concentração na atmosfera tem aumentado progressivamente.

Um estudo recente indica que 74% da população mundial estará exposta a ondas de calor mortíferas em 2100, caso as emissões de gases com efeito de estufa continuarem a subir nas taxas atuais e, mesmo que as emissões desçam drasticamente, é expectável que, ainda assim, atinja 48% da população (Camilo, Dousset, Caldwell, & Powell, 2017).

A produção e o consumo de energia são indissociáveis deste problema, no entanto, estão vinculados, da mesma forma, com outros impactes ambientais como a poluição atmosférica, as chuvas ácidas, a destruição da camada de ozono, a destruição florestal e a emissão de substâncias radioativas (A. Fernandes, Guerra, Ribeiro, & Rodrigues, 2016).

De forma a reduzir o consumo energético Europeu e, por conseguinte, os problemas económicos e ambientais que daí advém, a União Europeia definiu objetivos relativos ao clima e energia para 2020, onde os Estados-Membros se comprometem a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 20%, aumentar 20% a proporção de fontes de energia renováveis no cabaz energético da União Europeia e a alcançar uma meta de 20% de eficiência energética. Para 2030, as metas solicitadas visam uma redução da emissão de gases com efeito de estufa de 40%, um aumento de 27% da parte de energia proveniente de fontes renováveis e 27% de melhoria na eficiência energética (União Europeia, 2012).

Atendendo aos objetivos da União Europeia em matéria de energia e alterações climáticas, ao nível dos edifícios há um grande potencial de redução de impactes ambientais. Uma análise efetuada pela Comissão Europeia mostrou que é possível reduzir as emissões neste sector em cerca de 90% até 2050, comparando com os valores de 1990.

Estima-se que, em edifícios de habitação, os impactes ambientais mais significativos estão associados ao consumo energético na fase de utilização do edifício, representando 80% a 94% do consumo energético total do seu ciclo de vida. A extração de materiais, transporte e produção representa entre 6% e 20% do consumo de energia total e menos de 1% é despendido na fase de fim de vida (Bragança & Mateus, 2011). Tendo em conta estes dados, constata-se a necessidade de reduzir a procura de energia dos edifícios de habitação durante a fase de utilização, tornando-os mais eficientes.

Com a finalidade de aumentar os requisitos relativos ao desempenho energético dos edifícios, a UE reformulou a diretiva EPBD, definindo que, a partir de 1 de janeiro de 2021, todos os edifícios novos deverão ser altamente eficientes e possuir um balanço energético próximo de zero (União Europeia, 2010).

Uma vez que a construção anual de edifícios novos representa, atualmente, uma percentagem mínima relativamente à quantidade de edifícios existentes, o maior potencial de mudança reside

na reabilitação de edifícios. Apesar de ser uma oportunidade de economizar energia e melhorar o conforto dos ocupantes a vários níveis, a reabilitação dos edifícios existentes, continua a ser um grande desafio, principalmente devido aos elevados custos de investimento (Comissão Europeia, 2011).

O conceito nZEB, visa que os edifícios sejam autossuficientes, com balanço energético próximo de nulo, através da produção *in situ* de energia proveniente de fontes renováveis. Contudo, num contexto de reabilitação, para cumprir as metas e os requisitos definidos pelas diretivas Europeias, é necessário implementar medidas de reabilitação que permitam uma redução das necessidades energéticas. Este objetivo pode ser conseguido através de intervenções que visem melhorar as características térmicas da envolvente dos edifícios e através da instalação de equipamentos eficientes. Estas medidas, assim como a integração de sistemas de energia renovável, apontam para a diminuição do consumo de energia não renovável, diminuindo os impactes ambientais de ciclo de vida dos edifícios.

Por outro lado, as intervenções de renovação de edifícios traduzem-se em impactes ambientais incorporados, tanto nos materiais, como nas tecnologias solares e nos sistemas técnicos, que resultam da sua produção e extração de materiais. Neste sentido, o desafio desta dissertação é fazer um estudo que analise o ciclo de vida de diferentes cenários de reabilitação num edifício com integração de sistemas solares, e avaliar se estas resultam em benefícios ambientais e económicos durante a vida útil do edifício.

A utilização de fontes de energia renováveis apresenta um papel cada vez mais importante na conceção e reabilitação de edifícios, principalmente devido à economia de custos e à diminuição dos impactes ambientais decorrentes da redução do recurso a energia não renovável.

Existem poucos estudos que incorporam uma avaliação ambiental e económica de ciclo de vida de edifícios, e ainda menos de edifícios reabilitados. Assim, este trabalho assenta na avaliação ambiental e económica de ciclo de vida através do cálculo dos potenciais impactes ambientais e dos custos associados às medidas de melhoria de desempenho energético aplicadas a um edifício de referência do parque habitacional português.

1.2 Objetivos

Quando se pretende reabilitar um edifício de forma a torná-lo mais eficiente, é necessário elaborar um conjunto de soluções de reabilitação que aumentem o seu desempenho energético. Essas soluções implicam o recurso a grandes quantidades de materiais e sistemas que têm um impacto ambiental incorporado, associado à sua extração e produção.

O principal objetivo desta dissertação é a avaliação do desempenho de ciclo de vida de diferentes cenários de reabilitação de um edifício, assentes na integração de sistemas solares. Esta avaliação é baseada em vários indicadores, como o consumo de energia operacional, os custos e impactos ambientais decorrentes da fase de reabilitação e os custos e impactos ambientais resultantes do consumo de energia durante a fase de utilização.

De forma mais precisa, serão analisados e comparados diferentes cenários de reabilitação, com diferentes níveis de eficiência energética resultantes de intervenções ao nível da envolvente, dos sistemas técnicos e da integração de diferentes sistemas solares, aplicados a um edifício unifamiliar residencial tipo, contruído entre 1960 e 1990.

Pretende-se concluir se estas intervenções apresentam benefícios ao longo da vida útil do edifício, como a redução dos consumos energéticos e consequentemente uma redução dos potenciais impactos ambientais. Para tal, será efetuado um estudo de avaliação do desempenho energético e uma análise de ciclo de vida, contendo os potenciais impactos ambientais e os custos resultantes para cada cenário estudado.

Por conseguinte, salienta-se a importância de calcular o período de tempo que demora o investimento na reabilitação a resultar em benefícios, uma vez que este é um dos principais interesses dos donos de obra, principalmente quando são estes que ocupam os edifícios. Desta forma, será calculado o tempo de retorno energético (EPBT), o tempo de retorno das emissões de carbono (GPBT) e o tempo de retorno económico.

Neste seguimento, é também relevante avaliar isoladamente os benefícios da integração dos sistemas solares, em cada cenário de estudo, efetuando o cálculo do EPBT e do GPBT para cada sistema solar selecionado. Esta análise é essencial para estimar a influência que os sistemas

solares, tanto térmicos como fotovoltaicos, têm na redução da procura energética dos edifícios e na redução das emissões de gases poluentes.

O estudo será efetuado para diferentes zonas climáticas de Portugal, sendo selecionadas três zonas onde se verifiquem condições climáticas díspares ao longo do ano.

1.3 Organização da dissertação

A estrutura deste trabalho assenta em seis capítulos, tendo início na Introdução, onde é apresentado o problema que se pretende colmatar, o que se propõe fazer no sentido da sua resolução, e é indicada a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo, faz um levantamento de conceitos e estudos relevantes no domínio desta dissertação, fazendo uma análise do parque edificado Português, incidindo no desempenho energético dos edifícios, nas políticas energéticas à escala europeia e na utilização da energia solar.

No terceiro capítulo apresentam-se as metodologias implementadas para a concretização das avaliações de desempenho térmico, ambiental e económico do caso de estudo.

O quarto capítulo descreve o caso de estudo, incluindo a caracterização do edifício e dos cenários de reabilitação que serão objeto de comparação.

O quinto capítulo centra-se na apresentação dos resultados, acrescentada de uma análise detalhada dos mesmos, encontrando-se dividido pelos diferentes estudos desenvolvidos.

O último capítulo, apresenta as conclusões gerais do estudo e os desenvolvimentos que poderão ser realizados futuramente no âmbito da temática da presente dissertação.

A Figura 1.1 mostra a organização geral da presente dissertação.

| | |
|--|--|
| Introdução | Enquadramento |
| | Objetivos |
| | Estrutura da dissertação |
| | Estado da arte |
| | Análise do parque habitacional |
| | Desempenho energético nos edifícios de habitação |
| Metodologias de investigação | Energia solar |
| | Enquadramento |
| | Análise das necessidades energéticas |
| | Análise do desempenho ambiental |
| Caso de estudo | Análise económica de ciclo de vida |
| | Apresentação do caso de estudo |
| | Caracterização do edifício |
| Apresentação e discussão de resultados | Apresentação das medidas de melhoria |
| | Resultados do desempenho energético |
| | Resultados do desempenho ambiental |
| | Resultados do desempenho económico |
| Conclusões e desenvolvimentos futuros | Resultados para diferentes zonas climáticas |
| | Conclusões |
| | Desenvolvimentos futuros |

Figura 1.1 – Estrutura da dissertação.

2. LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE

2.1 Análise do parque habitacional português

Uma parte do parque habitacional português apresenta um estado de conservação que impõe a realização de intervenções de reabilitação. Verifica-se, por vários motivos, um decréscimo da construção de edifícios novos de habitação. Neste contexto, a reabilitação é o segmento do setor da construção que se tem vindo a afirmar com maior potencial de evolução (INE & LNEC, 2011).

Considerar as características do parque habitacional português e a evolução deste ao longo dos anos permite identificar as características mais comuns das habitações e em que épocas de construção foram concebidos a maioria dos edifícios existentes atualmente. Desta forma pretende-se que as características correspondentes ao caso de estudo desta dissertação englobem o maior número de edifícios possível.

2.1.1 Caracterização dos edifícios em Portugal

De acordo com os últimos dados, datados de 2015, estima-se que existiam 3.586.102 edifícios familiares clássicos em Portugal (INE, 2016). Tendo em conta que os últimos Censos foram realizados em 2011, os dados estatísticos deste capítulo corresponderão aos 3.544.389 edifícios clássicos existentes até 2011.

Desses edifícios, os construídos desde 1970 constituíam 63.1%. Isto significa que a maioria dos edifícios existentes no parque habitacional português é relativamente recente. Deste período, as épocas com maior número de edifícios construídos, foram de 1971 a 2000, tal como demonstra a Figura 2.1.

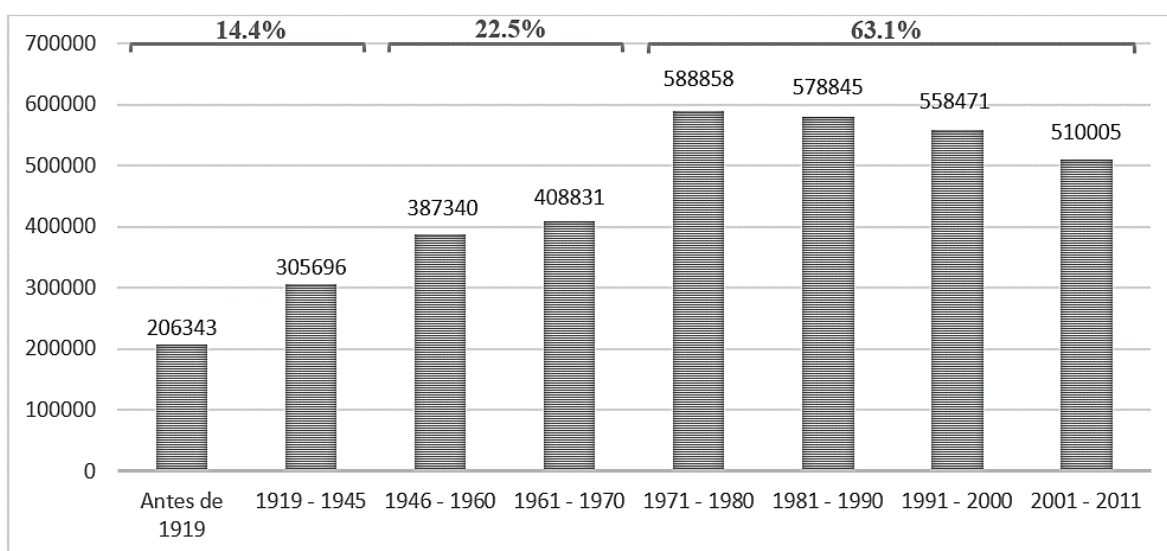


Figura 2.1 - Número de edifícios clássicos segundo a época de construção do edifício (INE & LNEC, 2011)

O parque habitacional português é maioritariamente constituído por edifícios de baixa altura. Em 2011, os edifícios com um e dois pisos representavam aproximadamente 85% do total de edifícios clássicos existentes.

Outro fator pertinente na caracterização dos edifícios portugueses, está relacionado com o número de alojamentos dos edifícios. Observando a figura 2.2 verifica-se que em 2011, 87,2% dos edifícios correspondiam a moradias. Os restantes 12,8% pertenciam a edifícios multifamiliares, com 2 ou mais alojamentos.

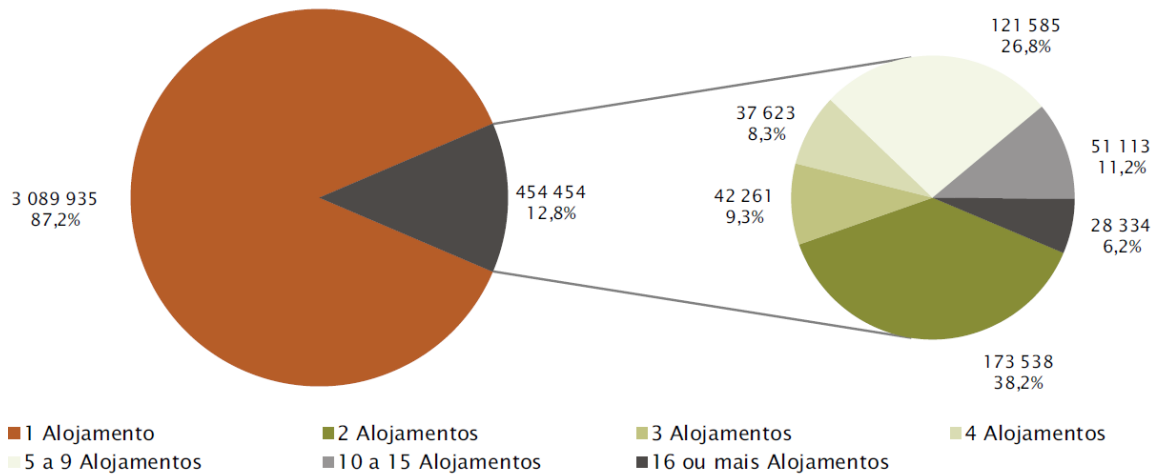


Figura 2.2 - Número de edifícios clássicos existentes em 2011 segundo o número de alojamentos (INE & LNEC, 2011)

2.1.2 Análise dos edifícios construídos entre 1961 e 1990.

De acordo com os dados do INE, o período de 1961 a 1990 corresponde a uma fase de expansão do betão armado na construção de estruturas de edifícios. Analisando a Figura 2.3, é possível verificar que até 1960 as estruturas eram em grande parte de paredes de alvenaria (com placa, sem placa ou de pedra solta). O crescimento da construção de estruturas em betão foi aumentando progressivamente e em 1980 mais de 50% dos edifícios eram construídos com estrutura em betão armado e a tendência seria para aumentar.

Os últimos dados conhecidos, datados de 2011, referem que os edifícios com estrutura em betão armado são os mais abundantes, tendo 48.6% dos edifícios estrutura de betão armado, 31.7% em paredes de alvenaria com placa e os restantes edifícios dispunham tipos de estrutura menos representativos.

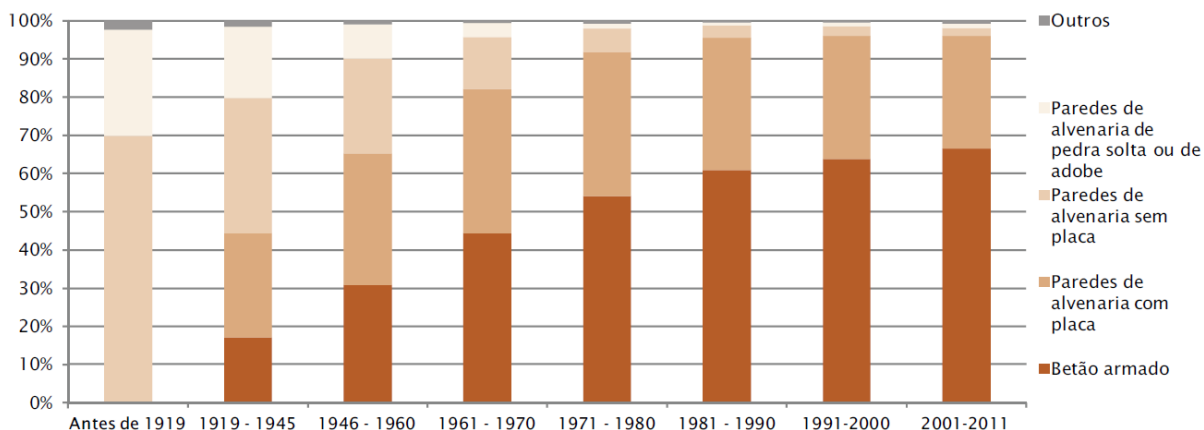


Figura 2.3 - Distribuição de edifícios clássicos segundo o tipo de estrutura de construção, por época de construção (INE & LNEC, 2011)

A proporção dos diferentes tipos de revestimento exterior das paredes foi-se mantendo proporcional ao longo das décadas, até 1990 (ver Figura 2.4).

O revestimento com reboco tradicional ou marmorite apresentou-se sempre em maioria, e o aumento foi progressivo até a década de 80. Em contrapartida, a proporção de edifícios com revestimento em pedra diminuiu, e de 1981-1990 apenas cerca de 5% dos edifícios construídos eram revestidos com pedra. Esta tendência foi invertida nas décadas seguintes, verificando-se um aumento do número de edifícios revestidos em pedra que representavam em 2011, cerca de 10% dos edifícios construídos nessa década.

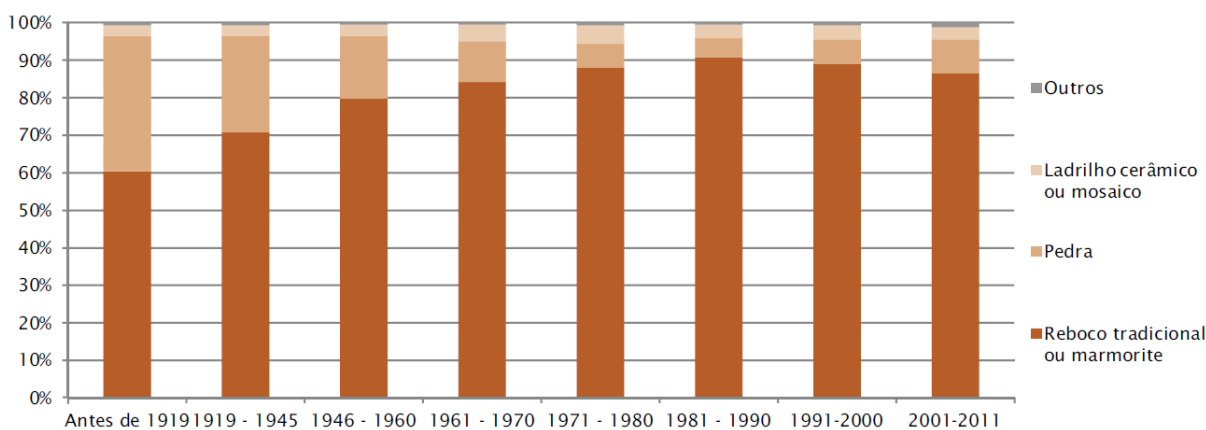


Figura 2.4 - Distribuição de edifícios clássicos segundo o tipo de revestimento exterior das paredes, por época de construção (INE & LNEC, 2011)

Em relação ao tipo de cobertura utilizado nos edifícios em Portugal, durante o último século e até ao presente, a grande maioria dos edifícios possui cobertura inclinada revestida a telha cerâmica ou de betão. Apesar da grande proporção de edifícios com este tipo de cobertura, esta tem diminuído ao longo dos anos, dando lugar a construções com cobertura plana, que integravam em 7% dos edifícios construídos em 2011. Também a cobertura de ladrilho cerâmico ou mosaico teve uma maior representatividade em edifícios de construção mais recente, embora de forma pouco expressiva.

Analisando as décadas em estudo, percebe-se que entre 1961 e 1970, cerca de 95% dos edifícios construídos era de cobertura inclinada revestida a telha cerâmica ou de betão.

2.1.3 Importância da reabilitação no contexto dos edifícios construídos entre 1961 e 1990.

O estado de conservação do parque habitacional é, no geral, satisfatório. Ainda assim, subsiste um número não desprezável de edifícios clássicos com necessidade de grandes reparações, ou então muito degradados.

Através da análise da Figura 2.5, é possível concluir que a maioria dos edifícios muito degradados foram construídos há várias décadas. No entanto, nos edifícios construídos entre 1961 e 1980 é ainda considerável a quantidade de edifícios muito degradados, e ainda mais com necessidade de grandes reparações. Estes números mostram a necessidade de reabilitar o parque habitacional português.

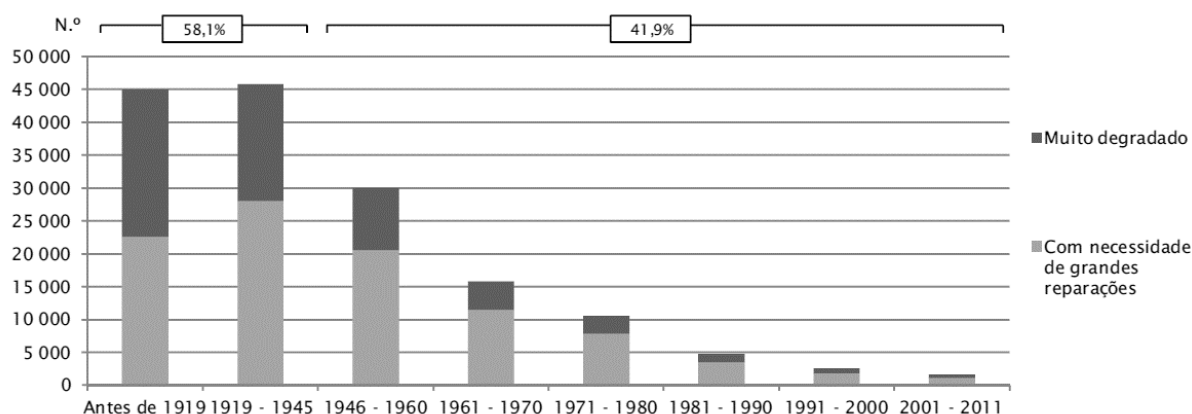


Figura 2.5 - Número de edifícios clássicos muito degradados ou com necessidade de grandes reparações segundo a época de construção do edifício (INE & LNEC, 2011)

O setor residencial em Portugal, é genericamente um setor envelhecido. Muitas habitações exigem intervenções que proporcionem melhor conforto aos seus ocupantes, não por estarem muito degradadas, mas devido a uma qualidade térmica e energética deficiente.

Os principais obstáculos à reabilitação de edifícios são a falta de capacidade de investimento e também a falta de incentivos. Noutros casos, existe falta de informação relativamente aos benefícios económicos que a reabilitação energética de edifícios pode proporcionar ao longo da sua vida útil (Fernandes, 2012).

Quando comparada com a construção de edifícios novos, a reabilitação apresenta algumas vantagens económicas, tais como a reutilização de materiais de construção, redução dos custos com demolições, redução dos custos de estaleiro, entre outros (Deliso, 2014).

A reabilitação energética de edifícios é, portanto, uma via promissora, pois permite proporcionar melhor conforto aos habitantes e uma redução dos consumos de energia que se traduz numa redução do valor da fatura energética.

2.2 Desempenho energético nos edifícios de habitação.

2.2.1 Consumo energético nos edifícios de habitação

Portugal apresenta uma grande dependência energética do exterior, sendo um dos principais desafios e objetivos da atual política energética nacional a redução dessa dependência. Os esforços realizados na exploração das energias renováveis têm sido crescentes, contudo, insuficientes.

A prova disso, são os valores referentes ao ano de 2016, em que a produção a partir de fontes de energia renováveis representou 64% do consumo elétrico em Portugal. Apesar de ser a maior percentagem registada nas últimas décadas, os dados da DGEG, indicam que em 2016 a produção de eletricidade renovável normalizada será apenas na ordem dos 52%. Este valor ainda é muito inferior ao necessário para se atingirem as metas de 60% de energia renovável no *mix* elétrico nacional em 2020 (APREN, 2016).

Ainda assim, em 2016, a eletricidade gerada em Portugal com recurso a fontes de energias renováveis representou 58% da produção nacional, a maior das últimas décadas.

O setor doméstico é o terceiro maior consumidor de energia, depois dos setores dos transportes e da indústria. O último balanço energético em Portugal cujos dados são conhecidos, aponta um consumo de 2.528.207 tep de energia no setor doméstico (ver Figura 2.6). Deste valor, a maioria do consumo (40.73%) corresponde ao uso de energia elétrica.

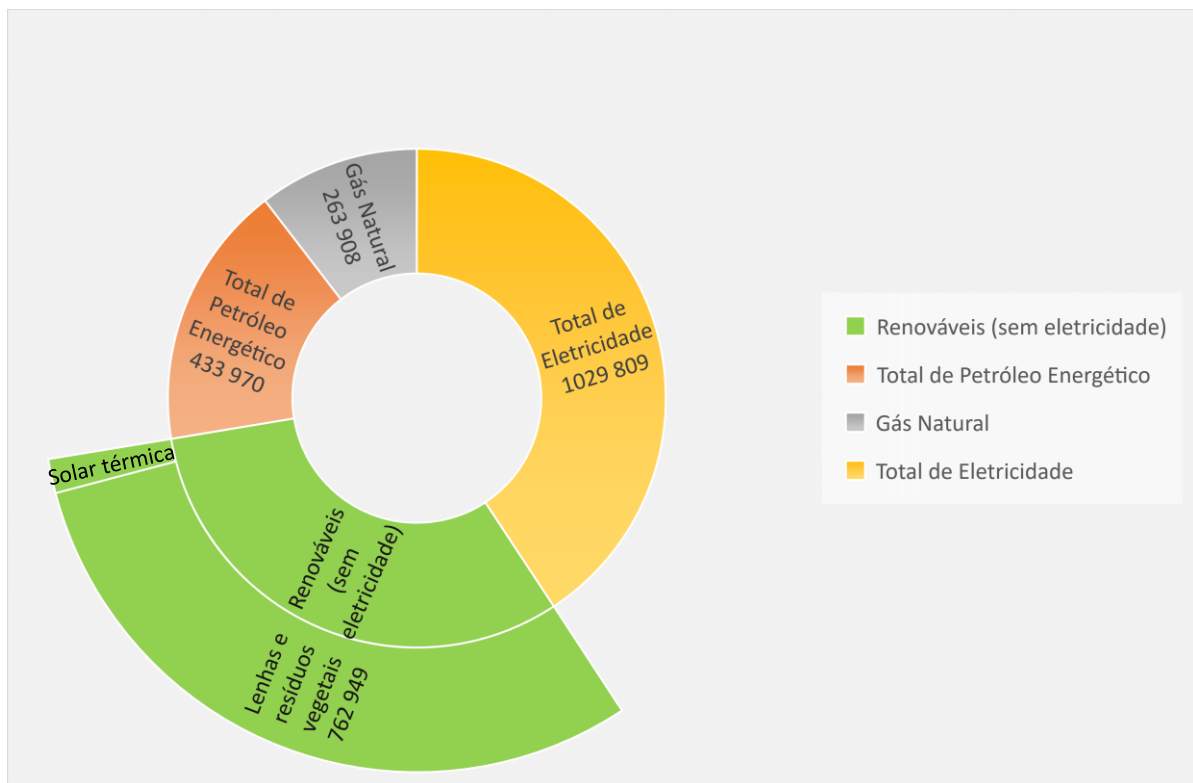


Figura 2.6 - Balanço energético do ano 2015 do setor doméstico, DGEG

É importante acentuar que as energias renováveis, neste caso a solar térmica, e principalmente as lenhas e resíduos vegetais, assumem a segunda posição em termos de consumo de energia no setor doméstico, apesar do valor ser inferior ao desejado para atingir as metas pretendidas.

O consumo de energia elétrica assume, atualmente, um papel bastante relevante no setor residencial, dado que a maioria dos equipamentos utilizados em habitações requer este tipo de fonte de energia. Por esta razão nos últimos anos a eletricidade surge como principal fonte de energia consumida (ver Figura 2.7).

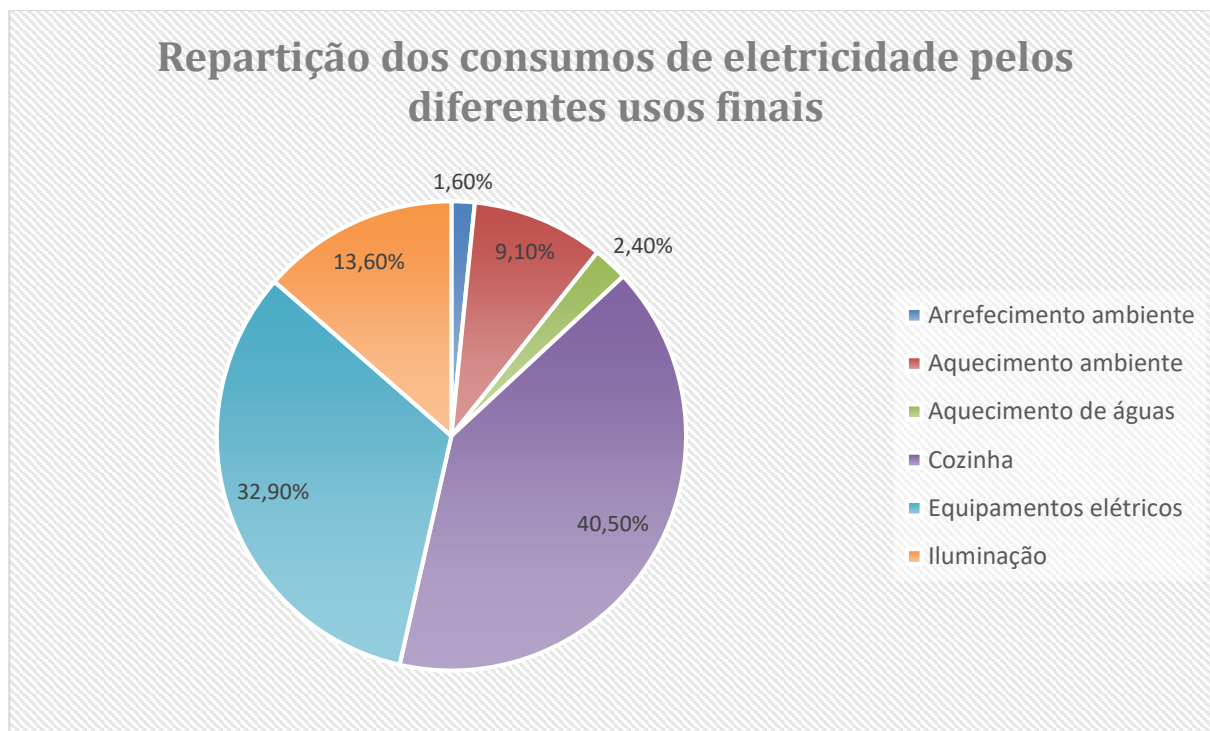


Figura 2.7 - Repartição dos consumos de eletricidade pelos diferentes usos finais (ADENE, 2011)

É visível a necessidade de tomar medidas que garantam o mais elevado nível de eficiência energética possível, nas fases de produção, transformação, distribuição e de utilização da energia. A utilização racional da energia depende de alterações no comportamento dos consumidores e deve ser complementada com tecnologias e/ou processos que se traduzem numa redução dos consumos (A. Fernandes et al., 2016).

2.2.2 Fatores determinantes para a eficiência energética de um edifício

A Eficiência Energética é um pilar fundamental para o decréscimo do consumo de energia em qualquer atividade humana. A melhoria da eficiência energética consiste em obter o melhor desempenho na produção de um serviço com o menor gasto possível de energia (LNEG, 2016).

É essencial que os consumidores alterem os seus comportamentos no sentido de evitar desperdício de energia, contudo, só é possível ser energeticamente eficiente se desde o momento em que a energia que existe na natureza se transforma em calor, frio, ou luz, se atuar de forma a evitar perdas, com base numa otimização dos sistemas (ADENE, 2017).

Desta forma, devem ser promovidas técnicas e medidas que visem minimizar os consumos energéticos dos edifícios ao longo do seu ciclo de vida, garantindo em simultâneo o conforto dos seus ocupantes.

Existem várias medidas que podem ser implementadas na construção e/ou renovação de edifícios, que se tornam determinantes para a eficiência energética do mesmo. Estão abaixo listados alguns procedimentos que podem trazer grandes benefícios a nível ambiental e económico:

- Utilização de cores claras nas paredes exteriores e interiores, pois apresentam melhores condições de reflexão;
- Potenciar a utilização de luz natural, permitindo uma redução dos consumos associados à necessidade de iluminação artificial;
- Substituir equipamentos de grande consumo energético por equipamentos com maior eficiência e, portanto, com menor consumo de energia;
- Considerar a melhor orientação solar do edifício de modo a potenciar os ganhos solares na estação de aquecimento e minimizar a captação da radiação na estação de arrefecimento;
- Utilizar palas horizontais ou verticais na estação de arrefecimento de forma a minimizar a incidência da radiação solar nos vãos envidraçados;
- Utilizar fontes de energia renovável;
- Introduzir isolamento térmico adequado na envolvente dos edifícios;
- Instalar janelas eficientes.

A utilização mais eficiente da energia representa vários benefícios. Proporciona uma redução da fatura energética aos consumidores, contribui para a redução da dependência da Europa em relação a fornecedores externos de fontes de energia, ajuda a combater as alterações climáticas e a tornar a economia da UE mais sustentável e competitiva.

2.2.3 Políticas Energéticas – Enquadramento legal

Numa época marcada pela aceleração do aquecimento global e pelo declínio do equilíbrio ambiental, a eficiência energética apresenta-se como uma importante estratégia para a

sustentabilidade. Contudo, para a sua implementação é necessária uma mudança de paradigma e uma nova estratégia e visão política.

Medidas que visem reduzir o consumo energético, a emissão de gases de efeito de estufa e a dependência energética do exterior são, atualmente, prioridades da Europa. Para corresponder a esta necessidade, a União Europeia, esta tem vindo a criar normas e medidas que impulsionem uma utilização mais eficiente da energia em todos os Estados Membros.

O Conselho Europeu apresentou nos últimos anos quadros de ação da UE relativos ao clima e à energia para 2020 e 2030, aprovando metas importantes para tornar a economia e o seu sistema energético mais competitivos, seguros e principalmente mais sustentáveis.

Até 2020 é expectável o cumprimento de três metas definidas, que visam:

- Aumentar em 20% a eficiência energética;
- Reduzir as emissões de gases com efeito e estufa em 20%, em comparação com os valores de 1990;
- Aumentar em 20% a contribuição das energias renováveis (União Europeia, 2012).

Em 2014 foram aprovadas as metas, a nível da UE, de política climática e energética para 2030 (Conselho Europeu, 2014):

- Uma meta vinculativa de pelo menos 40% de redução de emissões de gases de efeito de estufa, em comparação com os valores de 1990;
- Uma meta vinculativa de consumo de pelo menos 27% de energias renováveis em 2030;
- Uma meta indicativa de pelo menos 27% de melhoria na eficiência energética em 2030.

Em Portugal, a regulamentação energética mais recente está publicada no Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto, que engloba, num único documento, 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).

Por último, uma das metas definidas pela União Europeia é de que, até 2020, todos os edifícios novos deverão ser altamente eficientes e possuírem um balanço energético próximo do zero. Estes edifícios são denominados NZEB (Nearly Zero Energy Buildings). Até 31 de dezembro de 2020, todos os edifícios novos devem assegurar necessidades quase nulas de energia, enquanto que, para edifícios novos ocupados e detidos por autoridades públicas têm um prazo mais curto para aplicar esta medida, fixado em 31 de dezembro de 2018 (União Europeia, 2010).

2.2.4 Edifícios ZEB e nZEB

De forma a reduzir a energia consumida nos edifícios, a UE publicou diretivas relativas ao desempenho energético, exigindo que todos os edifícios construídos a partir de 1 de janeiro de 2021 tenham um balanço energético perto de nulo (União Europeia, 2010).

Nos edifícios tradicionais a maioria da energia total consumida é proveniente de combustíveis fósseis que são contribuintes significativos de gases de efeito estufa. Os edifícios de necessidades energéticas nulas ou quase nulas são vistos como um meio para reduzir as emissões de carbono e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

É neste contexto que surgem os NZEB (*Nearly Zero Energy Buildings*) e os ZEB (*Zero Energy Buildings*). Estes conceitos representam um edifício com consumo zero/quase zero de energia líquida, ou seja, a quantidade total de energia consumida pelo edifício numa base anual é aproximadamente igual à quantidade de energia renovável gerada pelo mesmo anualmente (ver Figura 2.8) (Futursolutions, 2015).

Existem três grandes abordagens para obter neutralidade energética nos edifícios. Trata-se, em primeiro, de reduzir a procura de energia, utilizando por exemplo equipamentos mais eficientes e isolar termicamente a envolvente. A segunda abordagem relaciona-se com a produção local de energia a partir de fontes renováveis, de modo a suprir as necessidades energéticas restantes e, se possível, produzir excesso de energia para alimentar uma rede inteligente de infraestruturas, sendo esta partilha de energia o último passo (BCSD Portugal, 2007).

Os ZEB e os nZEB são, portanto, edifícios com elevado nível de eficiência energética, quer pelo reduzido consumo de energia em relação aos edifícios convencionais, quer pela existência de sistemas de produção de energia renovável local que compensam as necessidades

energéticas, permitindo um balanço de zero ou quase zero, relativo ao consumo anual de energia (Futursolutions, 2015).

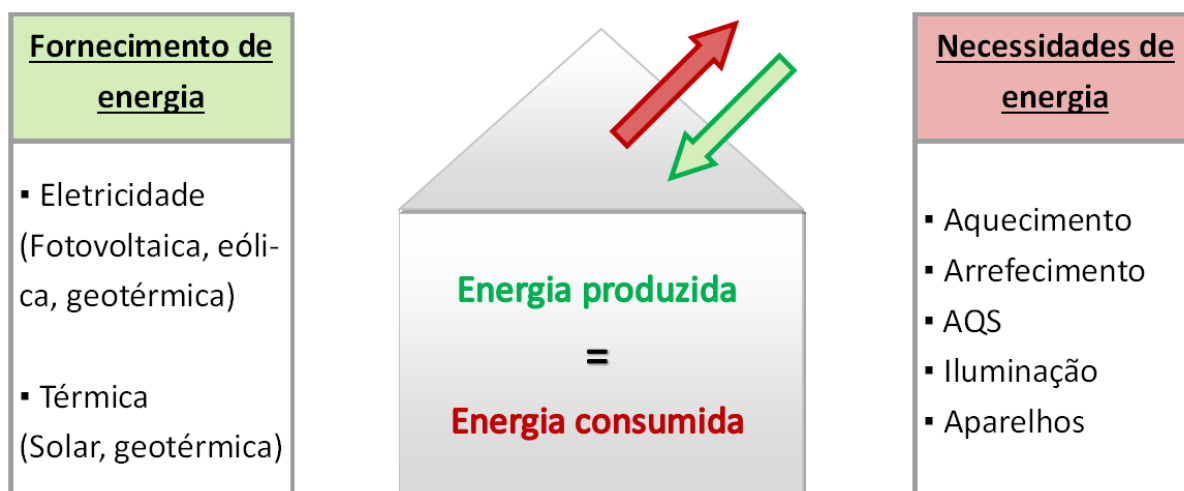


Figura 2.8 - Conceito ZEB

A maioria destes edifícios obtém, em certos períodos, metade ou mais da sua energia a partir da rede, mas possuem a capacidade de devolver a mesma ou maior quantidade de energia nos períodos em que produz mais energia do que a utilizada para autoconsumo.

2.3 Energia Solar

À semelhança do aumento da eficiência energética e da redução do consumo de energia, também a utilização de energia proveniente de fontes renováveis constitui uma medida importante na redução das emissões de gases com efeito de estufa.

Na União Europeia o consumo de energia no setor dos edifícios representa 40% do consumo total de energia, da qual a maior parte é consumida na produção de água quente e aquecimento dos espaços (União Europeia, 2010). Uma forma de reduzir a quantidade de energia não-renovável nos edifícios, é utilizando a energia solar.

Portugal é um dos países da Europa com maior disponibilidade de radiação solar. O número médio anual de horas de Sol, em Portugal, varia entre 2200 e 3000 horas, o que torna o país próspero no que diz respeito à exploração da energia solar para produção de energia (ADENE, 2016).

2.3.1 Sistemas solares térmicos

Um sistema solar térmico tem a função de converter a energia do Sol em calor útil, através de um coletor solar térmico colocado no exterior do edifício. Os coletores solares recebem a energia do Sol e transferem-na para um fluido térmico, que quando aquecido é encaminhado para um depósito, onde transfere a sua energia sob a forma de calor para a água armazenada.

A energia pode ser utilizada para o aquecimento de águas sanitárias, aquecimento de piscinas e servir de apoio aos sistemas de aquecimento central. Para aplicar a produção de água quente sanitária existem dois tipos de soluções: sistema termossifão e sistema de circulação forçada.

O sistema em termossifão funciona baseado no princípio da gravidade sem necessidade de recorrer a bombas circuladoras. Todos os componentes do sistema solar térmico estão no exterior do edifício e o depósito é colocado a uma altura superior à do coletor solar. O fluido térmico é aquecido no coletor e com o aumento da temperatura torna-se mais leve, fazendo com que se desloque para pontos mais altos, neste caso, até ao depósito, onde transfere a energia para a água armazenada. Este movimento é contínuo e só termina quando a radiação é baixa ou nula.

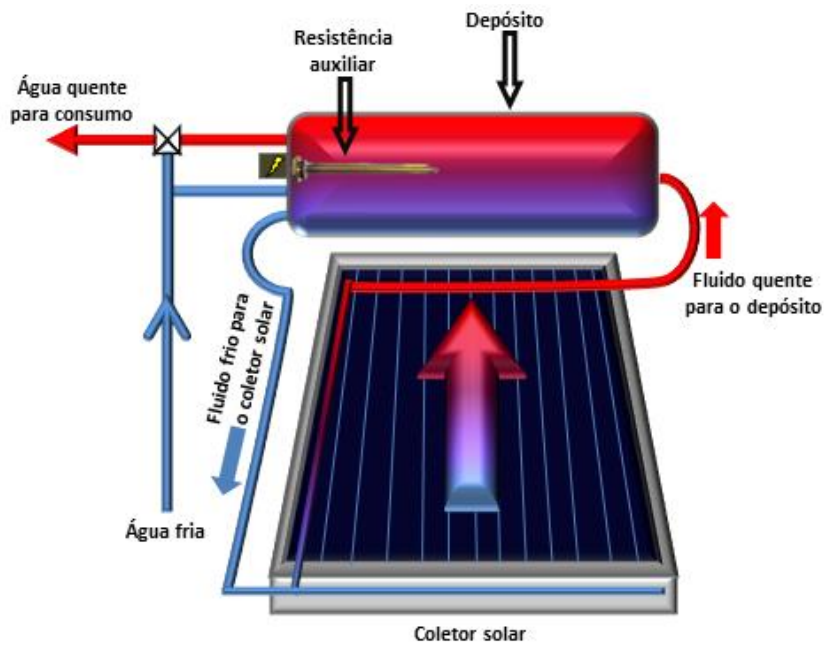


Figura 2.9 - Representação esquemática de um sistema solar térmico em termosifão (Trilhos Energéticos, 2015)

Por outro lado, o sistema de circulação forçada requer uma bomba de circulação para movimentar o fluido térmico do coletor solar para o depósito, o que permite a colocação do depósito em qualquer local, como por exemplo no interior dos edifícios. A bomba de circulação é comandada por um sistema de controlo que inclui sondas de temperatura, permitindo o seu acionamento apenas quando a temperatura do fluido térmico no coletor for superior à da água no depósito (ADENE, 2016).

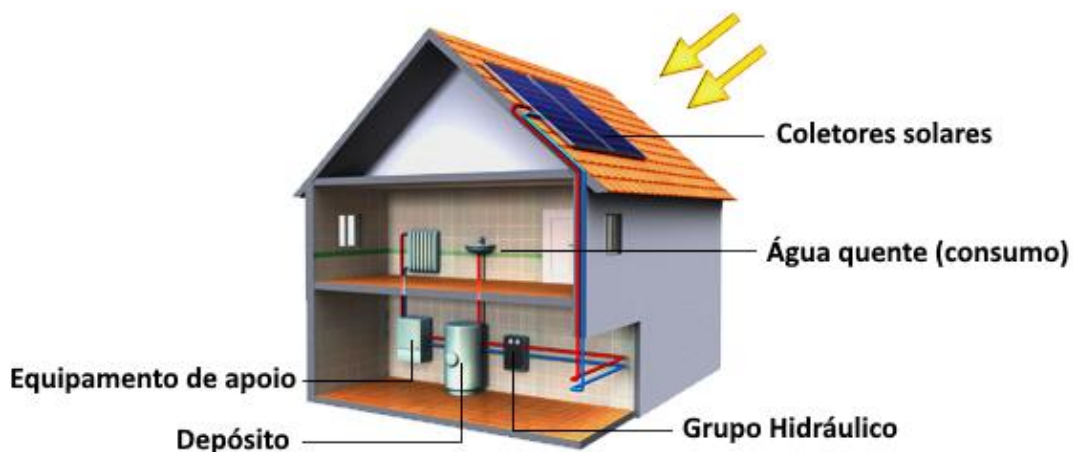


Figura 2.10 - Representação esquemática de um sistema solar térmico de circulação forçada (Trilhos Energéticos, 2015)

Existem ainda dois tipos de coletores solares que podem ser usados nas habitações: coletores planos e coletores de tubos de vácuo. Os primeiros são os mais utilizados em Portugal, pois têm bom funcionamento com as temperaturas compatíveis com o aquecimento de águas quentes sanitárias. O segundo consegue obter maiores temperaturas, com melhor rendimento comparando com os coletores planos. Isto, porque, o vácuo reduz consideravelmente a perda de calor por condução no interior dos tubos. Além disso, possibilitam a captação constante de energia, mesmo com temperaturas baixas, sendo necessário apenas a existência de luz solar (TISST, 2015).

2.3.2 Sistemas solares fotovoltaicos

A tecnologia solar fotovoltaica permite transformar diretamente a radiação solar em energia elétrica. Estes sistemas são normalmente constituídos por células solares fotovoltaicas, inversor de corrente, contador e, em alguns casos, por baterias.

As células fotovoltaicas, que captam a luz solar, possuem duas camadas com cargas opostas, uma negativa (excesso de eletrões) e outra positiva (falta de eletrões) de materiais semicondutores, sendo no geral o silício o material mais comum. Quando a camada negativa da célula absorve fotões suficientes, os eletrões são libertados dessa camada e migram para a camada positiva, criando assim uma diferença de potencial entre as duas camadas gerando corrente elétrica. Quanto maior for a intensidade do sol maior será o fluxo de eletricidade.

A corrente gerada nos painéis, não pode ser aplicada diretamente para uso doméstico já que a grande maioria dos aparelhos domésticos utiliza corrente alternada. Uma vez que a corrente gerada pelos painéis solares é corrente contínua, torna-se necessária a utilização de um inversor de corrente. Ao passar pelo inversor, a eletricidade converte-se em corrente alternada, ficando assim disponível para utilização na instalação elétrica do edifício.

A energia proveniente dos sistemas fotovoltaicos pode aproveitada de várias formas, como por exemplo, apenas para autoconsumo do edifício. Por outro lado, é possível ligar o sistema à rede elétrica nacional para injetar na rede a energia total produzida ou somente a energia não utilizada na habitação. Existe também a alternativa de armazenar a energia elétrica em baterias próprias, que permitem o uso gradual da energia quando necessária.

3. METODOLOGIAS DE INVESTIGAÇÃO

3.1 Enquadramento

O objetivo principal da presente dissertação é avaliar os benefícios ambientais e económicos que a integração de painéis solares em edifícios unifamiliares pode proporcionar durante o ciclo de vida dos edifícios.

O uso de sistemas solares, como o solar térmico e o solar fotovoltaico, pode resultar em várias vantagens durante a vida útil de um edifício, tanto a nível ambiental como económico. A nível ambiental permitem o uso de uma energia renovável (como alternativa aos combustíveis fósseis) e a nível económico, tem a vantagem de utilizar uma fonte de energia grátis para a maioria das necessidades (Silva, Mateus, Marques, Ramos, & Almeida, 2016).

No entanto, as tecnologias de energia solar têm também um impacto ambiental negativo, que está principalmente associado à sua produção e manutenção (Lamnatou, Chemisana, Mateus, Almeida, & Silva, 2015).

O fabrico e produção de sistemas de energia solar tem um impacto ambiental incorporado, para além de requererem uma quantidade considerável de materiais (Tsoutsos, Frantzeskaki, & Gekas, 2005).

Pretende-se, com a reabilitação, encontrar soluções que permitam reduzir os consumos energéticos, os custos de ciclo de vida e também reduzir os potenciais impactos ambientais de ciclo de vida.

Foram criados diferentes cenários de reabilitação do edifício de forma estudar as melhorias do desempenho energético e ambiental, resultantes de um conjunto de medidas de melhoria voltadas para a redução do consumo de energia durante o ciclo de vida do edifício. Assim, é possível comparar o cenário correspondente à situação atual do edifício antes da renovação, com mais três cenários de reabilitação considerados: cenário de reabilitação Base, cenário de reabilitação nZEB e cenário de reabilitação ZEB.

O cenário de reabilitação Base tem como objetivo que o edifício satisfaça os requisitos mínimos de desempenho energético, de acordo com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH). As medidas de renovação implementadas neste cenário correspondem a alterações na envolvente do edifício que apresentem o cumprimento dos requisitos mínimos para grandes intervenções, presentes no regulamento.

O segundo cenário de reabilitação, pretende que, mantendo a envolvente projetada para o cenário anterior e introduzindo um painel solar térmico com maior rendimento juntamente com a substituição dos equipamentos de produção de AQS e climatização por equipamentos mais eficientes, o edifício possa ser nZEB, ou seja, que consiga produzir no local grande parte da energia que consome. É esperado que esta reabilitação conduza a cerca de 80% de melhoria no desempenho energético, em comparação com comportamento do edifício sem renovação (Mestre, Almeida, & Iten, 2016).

O último cenário, reabilitação ZEB, visa a introdução de um painel fotovoltaico, que consiga produzir energia elétrica suficiente para suprir as necessidades remanescentes do edifício. É intenção que o balanço energético do edifício seja zero e, por essa razão, foi denominado cenário de renovação ZEB (Zero Energy Building).

Na Tabela 3.1 estão descritas as intervenções realizadas em cada cenário.

Tabela 3.1 – Medidas de reabilitação aplicadas a cada cenário em estudo

| Cenários de reabilitação | Intervenções |
|---------------------------------|---|
| Base | <ul style="list-style-type: none"> - Aplicação de isolamento térmico nas paredes exteriores, pavimento e cobertura; - Renovação dos vãos envidraçados; - Aplicação de dispositivos exteriores de proteção solar nos vãos envidraçados. - Introdução de sistema solar térmico com painéis de modelo padrão do REH; - Colocação de palas horizontais nas janelas orientadas a Sul. |
| nZEB | <p>As mesmas intervenções da renovação Base, adicionando:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Substituição dos sistemas de climatização e produção e AQS por equipamentos mais eficientes; - Introdução de um sistema solar térmico de maior rendimento. |
| ZEB | <p>As mesmas intervenções da renovação ZEB, adicionando:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Colocação de painéis solares fotovoltaicos. |

Propõe-se também fazer uma comparação entre os cenários de reabilitação, de forma a determinar a influência das alterações realizadas de cenário para cenário. Cada alteração realizada tem um impacto na eficiência energética do edifício, no ambiente e nos custos de reabilitação, que são os fatores em estudo nesta dissertação.

Mais concretamente, comparando o edifício sem renovação com a reabilitação base, consideram-se as intervenções realizadas ao nível da envolvente, avaliando o impacto que estas têm. O cenário nZEB tem as mesmas características que o cenário Base ao nível da envolvente, no entanto foi acrescentado um sistema solar mais eficiente, assim como equipamentos mais eficientes para climatização e AQS, conseguindo avaliar, através da comparação dos dois cenários, o impacto que estes têm na eficiência energética do edifício. De forma análoga, o cenário ZEB difere do nZEB pela introdução de um sistema solar fotovoltaico, permitindo avaliar o impacto desta alteração.

O período de referência considerado em todo o estudo é de 30 anos, sendo este um valor normalmente considerado para a vida útil de um edifício reabilitado.

3.2 Análise das necessidades energéticas

O consumo de energia de uma habitação depende de diversos fatores, tais como da zona climática onde se situa o edifício, a qualidade de construção, o nível de isolamento, o tipo de equipamentos utilizados e o modo como são utilizados (ADENE, 2011).

É importante que as soluções de reabilitação tenham o menor impacto ambiental possível. Quanto maiores forem os consumos de energia do edifício, maiores são os impactos ambientais durante o seu ciclo de vida, logo o primeiro passo na reabilitação é tomar medidas no sentido de diminuir os consumos energéticos do edifício.

Atendendo a que o edifício em estudo, construído entre 1961 e 1990, não possui isolamento térmico, e os equipamentos são de baixa eficiência, é de esperar que os gastos energéticos deste sejam elevados, e, portanto, tenha um mau desempenho energético. Isto porque, como representado na Figura 3.1, um edifício bem isolado termicamente, vai permitir minimizar as trocas térmicas, evitando assim a perda de energia do interior para o exterior no inverno e o sobreaquecimento no verão.

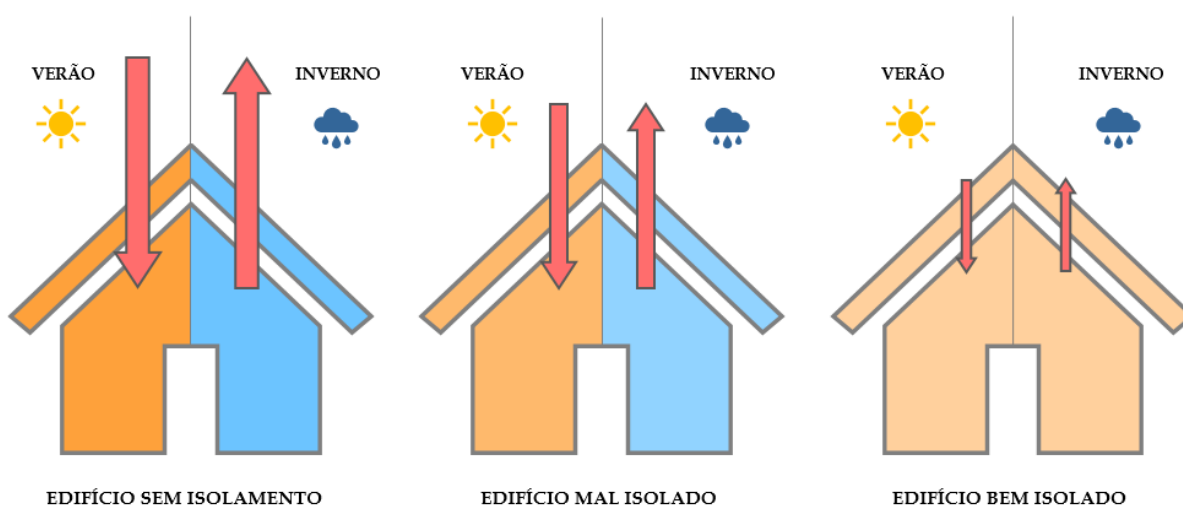


Figura 3.1 - Variação dos ganhos de calor no verão e das perdas de calor no inverno consoante o nível de isolamento do edifício

De modo a estudar o comportamento térmico do edifício para as diferentes soluções adotadas, foi utilizado o procedimento de cálculo descrito na regulamentação portuguesa em vigor para o efeito, o Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto que estabelece o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) (Portugal, 2013b). O REH define os requisitos para os edifícios de habitação, novos ou sujeitos a intervenções, bem como os parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético, em condições nominais, de todos os edifícios de habitação e dos seus sistemas técnicos (Portugal, 2013b).

O objetivo do estudo energético incide em encontrar medidas que visem minimizar os consumos energéticos do edifício em estudo ao longo do seu ciclo de vida, garantindo em simultâneo o conforto dos seus ocupantes. Os requisitos mínimos de qualidade térmica da envolvente e de eficiência de sistemas impostos pelo REH, ao serem cumpridos na reabilitação das habitações, conduzem a necessidades energéticas baixas.

Segundo o regulamento, obras de reabilitação que impliquem a renovação de mais de 25% da superfície da envolvente do edifício renovada, são consideradas grandes reabilitações. Tendo em conta que a reabilitação do edifício do caso de estudo engloba toda a envolvente do edifício, é considerada uma grande reabilitação.

O estudo energético do edifício foi realizado através de uma folha de cálculo de aplicação do REH que incorpora toda a metodologia de cálculo do desempenho energético de edifícios de habitação, concebida e disponibilizada pela associação ITeCons (ITeCons, 2016).

3.2.1 Características térmicas da envolvente

A qualidade térmica da envolvente de um edifício é avaliada, principalmente, através do coeficiente de transmissão térmica de cada elemento construtivo. Este coeficiente representa a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária de um elemento da envolvente, por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que este separa. É calculado através da equação 3.1, segundo o Despacho 15793-K/2013 do REH.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum R_j + R_{se}} \quad [W/(m^2 \cdot ^\circ C)] \quad (3.1)$$

Em que:

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

R_j – Resistência térmica da camada j da solução construtiva, [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];

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

As resistências térmicas e a condutibilidade térmica dos materiais, foram calculadas com base nos valores indicados no documento do LNEC, denominado ITE50 (Santos & Matias, 2006).

O fator solar dos vãos envidraçados (g_T) é também um importante indicador quando se pretende a minimização de sobreaquecimento dos espaços na estação de arrefecimento. Este fator relaciona a energia transmitida para o interior do edifício através de um vão envidraçado com o respetivo dispositivo de proteção ativado e a energia da radiação solar que nele incide.

Não podem ser ultrapassados os valores-limite de qualidade térmica da envolvente correspondentes ao coeficiente de transmissão térmica superficial dos elementos na envolvente opaca, conforme a Portaria n.º 379-A/2015 do REH, e ao fator solar dos vãos envidraçados, conforme a Portaria n.º 349-B/2013 (Portugal, 2015).

As soluções construtivas de reabilitação da envolvente foram definidas com base nos coeficientes de transmissão térmica máximos ($U_{m\acute{a}x}$). O procedimento adotado para a escolha da reabilitação de cada elemento construtivo está disposto na Tabela 3.2. Desta forma, todos os elementos cumprem os requisitos mínimos impostos pelo REH.

Tabela 3.2 - Procedimento adotado para definir as alterações realizadas em cada elemento construtivo de forma a cumprirem os requisitos mínimos impostos pelo REH

| Elemento construtivo | Alterações | Procedimento |
|-----------------------------|--|--|
| Paredes exteriores | Colocação de sistema ETICS: aplicação de isolamento térmico pelo exterior do edifício. | Acrescentou-se uma camada de isolamento, com a espessura mínima que permite ao elemento construtivo cumprir o requisito de $U_{m\acute{a}x}$. |

| | | |
|-----------------------|---|---|
| Pavimento e Cobertura | Estando estes elementos em contacto com espaços não úteis, aplica-se isolamento térmico pelo lado em contacto com o espaço não útil. | Acrescentou-se uma camada de isolamento, com a espessura mínima que permite ao elemento construtivo cumprir o requisito de $U_{máx}$. |
| Vãos envidraçados | Renovação dos vãos envidraçados. | Os vãos envidraçados e os dispositivos de proteção exterior foram substituídos de modo a selecionar uma solução que possua um coeficiente de transmissão térmica de elementos envidraçados (U_w) igual ou menor que $U_{w,máx}$. |
| | Colocação de dispositivos de proteção solar na parte superior dos envidraçados orientados a sul, devido à maior exposição solar a que estão sujeitos. | Considerou-se que os dispositivos são ativados apenas na estação de arrefecimento; Foi considerado um ângulo da pala horizontal de 30°. |

3.2.2 Ventilação e Sistemas técnicos

A taxa de renovação do ar foi calculada com auxílio de folha de cálculo disponibilizada pelo LNEC, que implementa os métodos de cálculo definidos pelo REH na Portaria n.º 349-B/2013, no Despacho n.º 15793-E/20313, no Despacho n.º 15793-I/20313 e no Despacho n.º 15793-K/20313 (LNEC, 2014). Este último despacho recomenda que, na estação de arrefecimento, o valor da taxa de renovação de ar seja superior a 0.6 h^{-1} .

A informação disponibilizada relativamente ao edifício a ser estudado, não contém dados acerca dos sistemas técnicos de aquecimento e arrefecimento, nem das suas características. Para efeitos de comparação do edifício antes e após a reabilitação, é necessário considerar que o edifício dispõe desses sistemas. Por essa razão, foram consideradas as soluções de referência de sistemas descritas no REH para a situação em que os sistemas não se encontram especificados ou instalados, denominados sistemas por defeito. Foram também tidos em conta os requisitos mínimos de eficiência energética de sistemas para todos os equipamentos selecionados.

A instalação de painéis solares térmicos para aquecimento de águas sanitárias é obrigatória, não só para edifícios novos, mas também para grandes renovações. Assim sendo, adicionou-se à renovação base, que visa satisfazer apenas os requisitos mínimos regulamentares, um sistema solar de coletores padrão com as seguintes características, descritas na Portaria n° 349-B/2013:

- Orientação a Sul e inclinação 35°;
- Coletores planos com área de abertura de 0.65 m² por ocupante;
- Rendimento ótico de 73%;
- Coeficiente de perdas térmicas $a_1=4.12 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $a_2=0.014 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$;
- Modificador de ângulo para incidência de 50° igual a 0.91.

Para as restantes renovações foi selecionado um sistema solar térmico com maior rendimento, capaz de produzir mais energia, de forma a satisfazer uma maior percentagem das necessidades de AQS.

Em relação ao sistema solar fotovoltaico, incluído no cenário ZEB, para efeitos de cálculo da energia por ele produzida, foi contabilizada a redução de eficiência dos painéis fotovoltaicos ao longo da sua vida útil, considerando uma perda de produção de 0.64% em cada ano (Jordan & Kurtz, 2012).

O cálculo da energia produzida pelos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos foi realizado com recurso ao programa informático SCE.ER, fornecido pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), elaborado em folhas de cálculo (DGEG, 2016). Este programa implementa as metodologias oficiais do Sistema de Certificação de Energética dos Edifícios (SCE).

3.2.3 Balanço energético

A avaliação do comportamento energético do edifício é realizada com base nos seguintes indicadores energéticos:

- Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic});
- Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (N_{vc});
- Necessidades nominais anuais globais de energia primária (N_{tc});
- Energia útil para preparação de água quente sanitária (Q_a);
- Energia produzida a partir de fontes renováveis (E_{ren});

Os valores limite dos parâmetros acima referidos não podem ser excedidos no caso de edifícios novos. Todavia, para edifícios sujeitos a grande intervenção, como é o caso em estudo, os limites estabelecidos pelo REH são os apresentados na Figura 3.2.

| Ano de construção | N_{ic}/N_i | N_{vc}/N_v | N_{tc}/N_t |
|-------------------|---------------|---------------|--------------|
| Anterior a 1960 | Não aplicável | Não aplicável | 1,50 |
| Entre 1960 e 1990 | 1,25 | 1,25 | 1,50 |
| Posterior a 1990 | 1,15 | 1,15 | 1,50 |

Figura 3.2 - Requisitos energéticos para edifícios sujeitos a grandes intervenções em função da época de construção do edifício

Para efeitos regulamentares, nem toda a energia produzida pelo painel solar fotovoltaico é contabilizada. O cálculo da energia primária apenas integra a energia utilizada para autoconsumo do edifício. A energia que é transferida para a rede ($E_{ren,ext}$) não é contabilizada.

3.3 Análise do desempenho ambiental de ciclo de vida

Propõe-se avaliar o desempenho ambiental do edifício em estudo, antes e após as renovações, de modo a estimar os benefícios ambientais que o conjunto de ações de melhoria de cada cenário proporciona, ao longo do tempo de vida considerado. No sentido de cumprir este objetivo, foram considerados três indicadores para análise:

- Impactes ambientais de ciclo de vida, que resultam do método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) utilizado;
- Tempo de retorno energético, EPBT (*Energy payback time*);
- Tempo de retorno das emissões de carbono, GPBT (*Greenhouse gas payback time*).

Os dois últimos, são parâmetros que pretendem avaliar o custo-benefício ambiental resultante de cada cenário de reabilitação. Neste caso, o EPBT é o período de tempo que o edifício em estudo demora a recuperar a quantidade de energia utilizada para a sua renovação, comparando com o cenário sem reabilitação. O GPBT marca o período a partir do qual as emissões de CO₂

incorporadas nos materiais de reabilitação são compensadas pela economia de emissões de gases de efeito de estufa associadas à redução do consumo energético.

A Análise Ambiental de Ciclo de Vida é uma ferramenta que analisa o ciclo de vida de um produto e identifica os impactos ambientais de cada fase, desde a extração, produção, disposição e utilização das matérias primas até ao fim da sua vida, incluindo a reciclagem e deposição final do produto (Comodi et al., 2016).

O processo de avaliação de ciclo de vida foi realizado conforme a norma ISO 14044:2006 onde são adotadas as seguintes etapas (ver Figura 3.3):

- Definição do objetivo e do âmbito;
- Análise de inventário;
- Avaliação de impacto;
- Interpretação dos resultados (Portugal, 2006).

Esta última fase será abordada no Capítulo 5, que corresponde à apresentação e interpretação dos resultados obtidos.

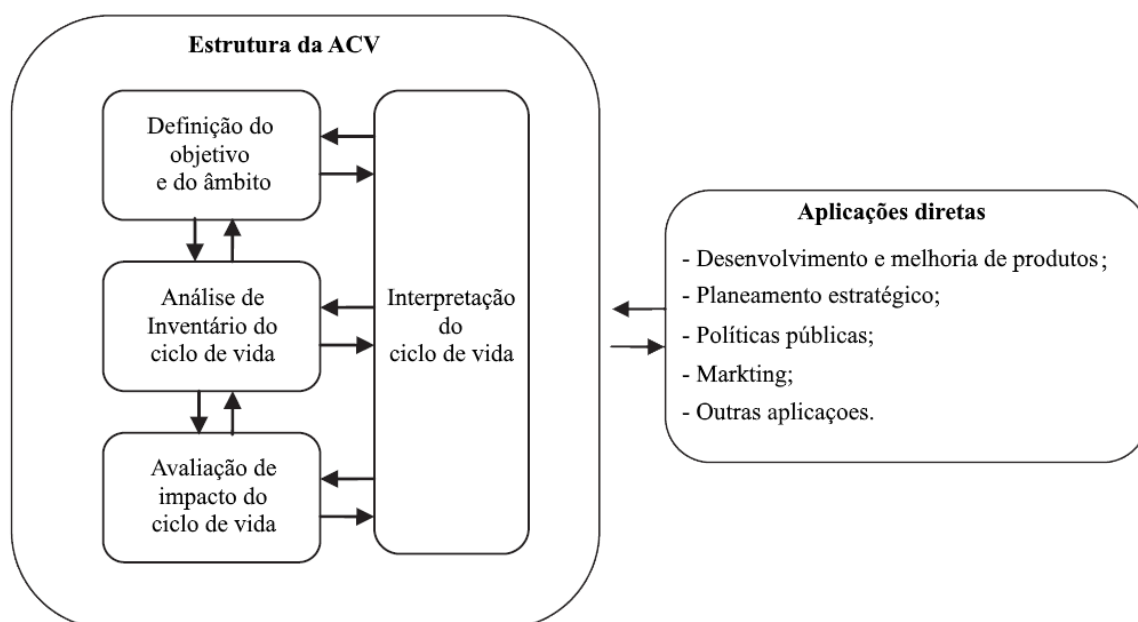


Figura 3.3 – Estrutura da Análise de Ciclo de Vida (Technical Committee ISO/TC 207, 2006)

3.3.1 Definição do objetivo e do âmbito

O edifício em estudo, que será definido no capítulo seguinte, constituirá o sistema a avaliar nesta análise de ciclo de vida.

O objetivo desta análise equivale a determinar os impactes ambientais resultantes do ciclo de vida do edifício em estudo, antes e após a reabilitação, e analisar se as medidas de melhoria de cada cenário de reabilitação proporcionam benefícios ambientais, comparando com o cenário sem intervenção, durante a vida útil prevista para o edifício.

Em pormenor, compreende-se que as medidas de reabilitação implicam a introdução de um conjunto de materiais e equipamentos que aumentam a energia incorporada do edifício e, portanto, produzem um impacte ambiental. Pretende-se, com a avaliação de ciclo de vida, determinar se os impactes ambientais resultantes das obras de reabilitação serão compensados pelos benefícios da economia de energia ao longo do período de vida útil do edifício ou se esse investimento nunca chegará a ser recompensado. Além disso, uma análise de comparação entre cada cenário de renovação também será considerada.

Sendo este um estudo comparativo, torna-se essencial que os sistemas sejam comparados com base numa função equivalente. Neste caso, é considerado como unidade declarada, o impacte ambiental associado à reabilitação de um edifício com diferentes níveis de eficiência energética: cenário sem reabilitação, cenário base, cenário nZEB e cenário ZEB.

As fronteiras físicas do sistema englobam todo o edifício, incluindo a energia necessária para climatização e AQS, assim como os materiais utilizados para as operações de reabilitação e manutenção do mesmo.

No caso a estudar, a análise de ciclo de vida será *cradle-to-gate* (“do berço ao portão”), incluindo também a fase de utilização. Isto é, irá conter apenas as fases desde a extração das matérias primas até ao produto final estar pronto a sair da fábrica (antes de ser transportado para a obra) e a fase de utilização do edifício, não considerando as restantes fases de ciclo de vida.

O estudo é aplicado em contexto nacional, sendo o caso de estudo implementado nas zonas climáticas do Porto, Vila Real e Beja. Será apresentado um estudo detalhado para o primeiro local, no entanto, para os dois últimos, os resultados serão apresentados de forma resumida, apenas para efeitos de comparação, uma vez que a metodologia utilizada é a mesma.

Finalmente, no que diz respeito à avaliação do desempenho ambiental, esta será efetuada com base nos seguintes indicadores de impacto ambiental:

- Potencial de diminuição de reservas de recursos abióticos;
- Potencial de aquecimento global;
- Potencial de destruição da camada de ozono;
- Potencial de formação de ozono troposférico;
- Potencial de acidificação;
- Potencial de eutrofização;
- Energia não renovável incorporada;
- Energia renovável incorporada.

3.3.2 Inventário de ciclo de vida

O inventário do ciclo de vida é a fase da ACV que envolve a compilação e quantificação dos fluxos de entrada e dos fluxos de saída relevantes para todo o ciclo de vida do edifício. As entradas referem-se a tudo o que é fornecido ao edifício, como por exemplo, equipamentos e energia. De forma análoga, as saídas correspondem às emissões ou produtos que resultam dos processos.

Tal como ilustrado na Figura 3.4, a análise ambiental de ciclo de vida inclui todas as entradas no sistema de matéria-prima, água e energia e as saídas correspondentes a emissões para a atmosfera, água e solo, ao longo do ciclo de vida do edifício.



Figura 3.4 - Entradas e saídas na fronteira física do sistema em análise

O inventário de ciclo de vida tem como resultado quantificar todos os fluxos de massa e energia envolvidos em todas as fases de ciclo de vida do edifício. Este procedimento torna-se bastante complexo, devido à grande quantidade de informação que é necessário recolher para cada sistema de produção.

Contudo, grande parte dessa informação está disponível na base de dados Ecoinvent, que fornece um conjunto de dados do inventário de ciclo de vida de milhares de produtos e é uma das fontes de informação mais aceites pelos especialistas em ACV. Foi utilizada para o estudo a versão Ecoinvent 3.0, que concede dados para diversas áreas, tais como, fornecimento de energia, agricultura, transportes, materiais de construção, biocombustíveis, tratamento de resíduos, entre outros (Ecoinvent, 2017).

Esta base de dados abrange as categorias de impacte ambiental a serem estudadas, que são quantificadas através do programa informático *SimaPro* (versão 8.0.5) (SimaPro, 2015). Tal como a maioria das ferramentas de avaliação de ciclo de vida, o *SimaPro* baseia-se numa abordagem *bottom-up*, o que significa que o impacte global de um edifício resulta do somatório do impacte de cada um dos seus materiais e componentes, incluindo também o consumo de energia (Erlandsson & Borg, 2003).

3.3.3 Análise dos Impactes de Ciclo de Vida

Segundo a NP EN ISO 14044, a Avaliação do Impacte de Ciclo de Vida (AICV) deve incluir dois elementos obrigatórios - classificação e caracterização; e quatro elementos opcionais - normalização, agregação, ponderação e análise da qualidade dos dados. Esta fase avalia a contribuição potencial dos produtos para as categorias de impacte ambiental, como por exemplo, o Aquecimento Global.

A fase de classificação visa a atribuição dos resultados do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) às categorias de impacte ambiental consideradas relevantes para o objetivo do estudo (ver Tabela 3.3). A título de exemplo, as emissões de CO₂ e de CH₄ contribuem para o aquecimento global, logo são atribuídas a essa categoria de impacte ambiental. Algumas emissões podem ser atribuídas a uma ou mais categorias de impacte, como o caso do NO₂ que afeta potencialmente a acidificação e o aquecimento global, sendo atribuída às duas categorias.

Tabela 3.3 – Categorias de impacte consideradas e métodos utilizados na ACV

| Categorias de impacte ambiental | Unidade | Método ACV |
|---|---|----------------------------------|
| Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP_elements) | [kg Sb equiv.] | CML-IA baseline (v3.02) |
| Potencial de diminuição das reservas de recursos fósseis (ADP_FF) | [MJ equiv.] | CML-IA baseline (v3.02) |
| Potencial de aquecimento global (GWP) | [kg CO ₂ equiv.] | IPCC 2013 100a |
| Potencial de destruição da camada de ozono (ODP) | [kg CFC-11 equiv.] | CML-IA baseline (v3.02) |
| Potencial de formação de ozono troposférico (POCP) | [kg C ₂ H ₄ equiv.] | CML-IA baseline (v3.02) |
| Potencial de acidificação (AP) | [kg SO ₂ equiv.] | CML-IA baseline (v3.02) |
| Potencial de eutrofização (EP) | [kg PO ₄ equiv.] | CML-IA baseline (v3.02) |
| Energia não renovável incorporada (CED _{NRE}) | [MJ equiv.] | Cumulative energy demand (v1.09) |
| Energia total incorporada (CED _{TOTAL}) | [MJ equiv.] | Cumulative energy demand (v1.09) |

Em relação à fase de caracterização, esta aborda a contribuição relativa de cada resultado obtido no valor indicado de cada categoria de impacto considerada. Isto é, apesar de haverem várias emissões a contribuírem para a mesma categoria de impacto ambiental, a contribuição de cada uma não é igual. Nesse sentido, são definidos fatores de caracterização associados a cada emissão e a cada categoria de impacto, determinando um único índice que agrega todas as substâncias que contribuem para uma categoria de impacto (Campos, 2012).

A melhor forma de comparar o desempenho ambiental é agregar todos os impactos de forma a obter num único valor que represente o potencial de melhoria do desempenho ambiental de cada cenário considerado.

Por essa razão, foi estudada a fase de ponderação, que possibilita a determinação de indicadores globais, atribuindo pesos aos diferentes indicadores de impacto ambiental. A importância de cada parâmetro na avaliação do desempenho ambiental ao nível de cada indicador não é consensual e varia de metodologia para metodologia, dependendo também do caso de estudo.

No estudo realizado pela Agência Norte-Americana para a Proteção Ambiental (EPA) acerca da identificação das prioridades ambientais no sentido de identificar as prioridades para alocação dos seus recursos, foi analisada a importância relativa de 12 categorias de impacto ambiental. Tendo em conta que este é um dos estudos mais aceites internacionalmente, optou-se por adotar os pesos para cada um dos indicadores de impacto do caso em estudo tendo por base a importância relativa definida no estudo da EPA (ver Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Peso atribuído a cada indicador de impacto ambiental

| Indicador de impacto ambiental | Peso relativo (%) |
|---|--------------------------|
| Potencial de aquecimento global (GWP) | 38 |
| Potencial de destruição da camada de ozono (ODP) | 12 |
| Potencial de formação de ozono troposférico (POCP) | 14 |
| Potencial de acidificação (AP) | 12 |
| Potencial de eutrofização (EP) | 12 |
| Potencial de diminuição das reservas de recursos fósseis (ADP_FF) | 12 |

Conforme o pretendido, resta calcular o potencial de melhoria de desempenho ambiental (Eli) para cada cenário, visando estimar as melhorias dos cenários de reabilitação em comparação com o cenário sem reabilitação, tendo em conta o peso atribuído a cada indicador ambiental. Este cálculo é efetuado através da equação 3.2.

$$EI_i = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta EP_j \times w_j}{100} \quad (3.2)$$

Em que:

EI_i – Potencial de melhoria do desempenho ambiental associado ao cenário de reabilitação i ;

ΔEP_j – Variação do valor do indicador ambiental j , [%];

w_j – Peso atribuído ao indicador ambiental j , tendo por base os valores apresentados na Tabela 3.4.

3.4 Análise económica de ciclo de vida

O custo global de cada cenário de reabilitação foi calculado com base no Regulamento Delegado n.º 244/2012, que considera o critério do Valor Atual Líquido (VAL). Pretende-se com este método, determinar as vantagens económicas dos cenários de reabilitação energética.

De forma a ter um melhor entendimento dos valores dos custos considerados nesta análise de ciclo de vida do edifício, estes foram organizados por categorias, conforme ilustra a Figura 3.5, baseadas na norma EN 15459.

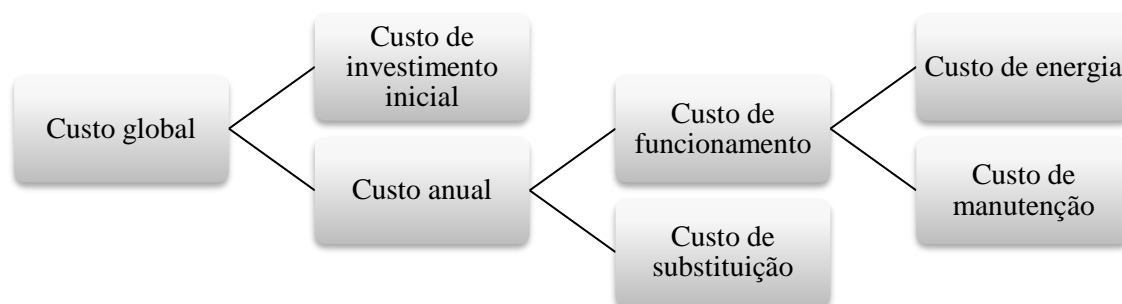


Figura 3.5- Categorização dos custos admitidos na análise económica de cada cenário

Os custos de investimento das reabilitações correspondem aos custos da obra de reabilitação, incluindo assim materiais de construção e mão-de-obra, para a aplicação do isolamento térmico, para a renovação dos vãos envidraçados, vãos opacos e telhas cerâmicas, substituição dos equipamentos técnicos e dos seus componentes, introdução dos sistemas solares e por último, limpeza e pintura das fachadas. Por outro lado, os custos de investimento do cenário sem renovação, dizem respeito apenas à substituição das telhas cerâmicas da cobertura, pintura das fachadas e renovação dos sistemas de aquecimento, arrefecimento e AQS.

Os preços relativos a todos os itens enumerados anteriormente foram retirados do programa informático Gerador de Preços do *CYPE*[®] (CYPE Ingenieros S.A., 2017). A base de dados deste programa informático permite obter custos de construção ajustados ao mercado e fornece a informação necessária sobre os custos associados às soluções construtivas, materiais, sistemas solares, equipamentos técnicos e mão de obra. Além disso, estima também os custos decenais de manutenção.

A manutenção do edifício, para efeitos do estudo económico compreende a manutenção de todos os elementos que foram adicionados ao edifício em cada renovação.

Neste seguimento, atendendo a que o período de vida útil de alguns componentes do edifício é menor que o ciclo de vida considerado para o próprio, é necessário fazer uma reposição dessas componentes no final da sua vida útil. O custo associado à reposição destes elementos está inserido nos custos de substituição. Ainda assim, considerou-se pertinente calcular o valor residual dessas componentes, a ser descontado ao custo total, conforme descrito nas orientações que acompanham o Regulamento Delegado nº 244/2012 (União Europeia, 2012).

Os preços adotados para a energia, tendo em conta os preços praticados em Portugal, são 0.22 €/kWh para a eletricidade e 0.06 €/kWh para o gás natural, com IVA incluído (ERSE, 2017). Foi considerado que o preço da energia aumenta 3% a cada ano.

Em relação à energia proveniente do sistema solar fotovoltaico, estabeleceu-se que uma parte será utilizada para autoconsumo do edifício e a eletricidade produzida em excesso será vendida à Rede Elétrica de Serviço Público (RESP). Para efeito de cálculo dos custos energéticos, a quantidade de eletricidade utilizada para autoconsumo é deduzida à quantidade de energia

elétrica total que o edifício consome, sendo apenas essa a quantidade de energia comprada à RESP.

A legislação aplicável à produção de eletricidade destinada ao autoconsumo e venda à rede elétrica de serviço público a partir de recursos renováveis está discriminada no Decreto-Lei n.º 153/2014 (Potugal, 2014).

A eletricidade excedente injetada na rede é remunerada aproximadamente ao valor médio dos preços do Operador do Mercado Ibérico de Energia, deduzido de 10%. A fórmula que estima o valor da energia elétrica fornecida à RESP encontra-se detalhada no Artigo 24.º do Decreto-Lei n.º 153/2014. O valor resultante desta fórmula varia em média entre os 0,04 € e os 0,05 € por kWh, e por essa razão assumiu-se que a energia vendida à rede seria remunerada a 0.045 €/kWh (sem IVA). Atualmente, a taxa do IVA destinada à eletricidade é de 23%, portanto, assumiu-se uma remuneração conservativa de 0.055 €/kWh (IVA incluído).

Foi também tido em conta, segundo o artigo 19.º da portaria n.º 14/2015, o pagamento obrigatório de uma taxa de registo do sistema fotovoltaico, que no presente caso, sendo a potência instalada de 1.8 kW, toma o valor de 100€ (Portugal, 2015).

Note-se que, para realizar uma projeção de custos de ciclo de vida, torna-se necessária a utilização de uma taxa de desconto (ou de atualização) de forma a converter os valores a pagar e a receber no futuro para o período atual. Uma taxa de desconto real entre 2% e 4%, excluindo a inflação, reflete os benefícios decorrentes dos investimentos em eficiência energética para os ocupantes do edifício ao longo de todo o ciclo de vida do investimento (União Europeia, 2012). Por essa razão, adotou-se uma taxa de desconto de 3%.

No sentido de tornar a taxa de desconto aplicável, é necessário determinar um fator de desconto (R_d) dado pela equação 3.3.

$$R_d(p) = \left(\frac{1}{1 + r/100} \right)^p \quad (3.3)$$

As variáveis têm o seguinte significado:

p – Número de anos desde o período inicial;

r – Taxa de desconto real.

Os custos globais referentes a cada cenário de renovação do edifício são calculados pela soma dos vários tipos de custos, aplicando a taxa de desconto, de modo a que o resultado final seja o custo atualizado ao início do período de cálculo, e considerando ainda o valor residual descontado (ver equação 3.4).

$$C_g(t) = C_I + \left[\sum_{i=1}^t (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,t}(j) \right] \quad (3.4)$$

Em que:

t – Período de cálculo;

$C_g(t)$ – Custo global (relativo ao ano 0) [€];

C_I – Custo de investimento inicial da renovação j [€];

$C_{a,i}(j)$ – Custo anual do ano i para a renovação j [€];

$R_d(i)$ – Fator de desconto para o ano i ;

$V_{f,t}(j)$ – Valor residual da renovação j no final do período de cálculo (em relação ao ano 0).

4. CASO DE ESTUDO

4.1 Apresentação do caso de estudo

O caso de estudo selecionado é um edifício residencial de referência, construído entre 1961 e 1990. Um edifício de referência destina-se principalmente a representar o parque imobiliário típico e médio existente num país.

As características do edifício foram cedidas pela ADENE, as quais se basearam em dados estatísticos acerca dos levantamentos dimensionais e tipos de sistemas utilizados em vários edifícios construídos nesta época.

Conforme os dados anteriormente apresentados, os edifícios cuja época de construção pertence aos anos de 1961 a 1990 representam 44.5% dos edifícios construídos até 2011, inferindo, portanto, que este tipo de edifício é bem característico do parque habitacional português.

Trata-se de uma habitação unifamiliar, de tipologia T3, constituída por um único piso, dispondo de 100 m² de área útil de pavimento. O levantamento dimensional está apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Levantamento dimensional do edifício em estudo

| | | | Un. |
|---------------------------|---|---------------------------------------|----------------|
| Área útil de pavimento | | 100 | m ² |
| Pé-direito | | 2,70 | m |
| Configuração | Tipologia | T3 | - |
| | Nº pisos | 1 | |
| | Nº frentes | 4 | |
| Cobertura | Área | 100 | m ² |
| | Tipo | Com desvão | - |
| Pavimento | Área | 100 | m ² |
| | Tipo | Em contacto com Espaço Não Útil (ENU) | - |
| Largura da fachada | | 10 | m |
| Área total de fachadas | | 108 | m ² |
| Envolvente exterior opaca | Área da envolvente exterior opaca | 93 | m ² |
| | Área da envolvente exterior opaca norte | 23,25 | m ² |
| | Área da envolvente exterior opaca sul | 23,25 | m ² |
| | Área da envolvente exterior opaca este | 23,25 | m ² |
| | Área da envolvente exterior opaca oeste | 23,25 | m ² |
| Envolvente envidraçada | Área total de envidraçados | 15 | m ² |
| | Área de envidraçados a norte | 3,75 | m ² |
| | Área de envidraçados a sul | 3,75 | m ² |
| | Área de envidraçados a este | 3,75 | m ² |
| | Área de envidraçados a oeste | 3,75 | m ² |

A localização selecionada para implantação do edifício incidiu sobre o distrito do Porto. Esta região apresenta um clima temperado mediterrânico, cujas amplitudes térmicas anuais são

pouco acentuadas, devido à proximidade com o oceano. Os dados climáticos de referência para a zona em estudo são os seguintes:

- Graus-dia: 1260;
- Zona Climática de Inverno: I1;
- Temperatura Média Exterior de Inverno: 9.9°C;
- Duração da estação de aquecimento: 6.2 meses;
- Zona Climática de Verão: V2;
- Temperatura Média Exterior de Verão: 20.9°C;
- Duração da estação de arrefecimento: 4 meses (Portugal, 2013a).

Os resultados detalhados do estudo serão apresentados para o edifício com local de implantação no distrito do Porto. Para além desta zona climática, será efetuado o mesmo estudo para o distrito de Vila Real e distrito de Beja. No entanto, para ambos, os resultados serão apresentados de forma resumida, apenas para efeitos de comparação.

As localizações foram selecionadas em função dos dados climáticos. Uma vez que as zonas selecionadas apresentam climas diferentes, será possível comparar a influência que este parâmetro detém sobre as necessidades energéticas dos edifícios e sobre a aplicação de sistemas solares em edifícios.

4.2 Caracterização do edifício

Os dados fornecidos pela ADENE contemplam o levantamento dos sistemas e de toda a envolvente do edifício, incluindo as soluções construtivas dos elementos que a constituem. A Tabela 4.2 apresenta todas as informações relativas à caracterização do edifício em estudo.

Tabela 4.2 - Caracterização do edifício em estudo

| Sistemas | | |
|--|---|---------------------------------|
| AQS | Esquentador | |
| Solares | Não instalado | |
| Aquecimento | Não instalado (Adotou-se o sistema por defeito descrito no REH) | |
| Arrefecimento | Não instalado (Adotou-se o sistema por defeito descrito no REH) | |
| Ventilação | Natural | $R_{ph,i} = 0.4 \text{ h}^{-1}$ |
| | | $R_{ph,v} = 0.6 \text{ h}^{-1}$ |
| Paredes exteriores | | |
| Descrição | Constituída por 22 cm de alvenaria de tijolo e 2 cm de reboco em ambas as faces. | |
| Cor | Clara | |
| Cobertura | | |
| Descrição | A laje é composta por blocos cerâmicos com 15 cm de espessura, sendo o teto revestido com 2 cm de estuque. O desvão é coberto com telha cerâmica. | |
| Cor | Clara | |
| b_{tr} | 1 | |
| Pavimento | | |
| Descrição | A laje do piso é aligeirada de blocos cerâmicos com 15 cm de espessura, sendo o pavimento revestido a ladrilho fixado em 4 cm de betonilha. O revestimento do teto é composto por 2 cm de reboco. | |
| b_{tr} | 0.8 | |
| Envidraçados | | |
| Descrição | Caixilharia metálica sem corte térmico, de correr e vidro simples. | |
| Proteção solar | As proteções solares exteriores são portadas opacas, enquanto as interiores são cortinas de cor clara. | |
| Obstruções horizonte | 20° | |
| Características adicionais | | |
| Inércia térmica média. | | |
| Possui rede de abastecimento de gás natural. | | |
| Os chuveiros não possuem certificado de eficiência hídrica com rótulo A ou superior. | | |

4.3 Apresentação das medidas de melhoria de cada cenário de reabilitação

Os cenários de reabilitação foram definidos no sentido de melhorar a eficiência energética do edifício. Ainda assim, foram incluídas diferentes alterações em cada cenário de forma a estudar a influência e relevância de cada uma delas.

Na Tabela 4.3 estão resumidas as intervenções no edifício apontadas para cada cenário, sendo especificadas nos subcapítulos seguintes em pormenor.

Tabela 4.3 – Intervenções realizadas em cada cenário de reabilitação

| Cenários de Reabilitação | Intervenções |
|---------------------------------|---|
| Base | <ul style="list-style-type: none"> - Isolar termicamente as paredes exteriores, com aplicação de placas de 5 cm de poliestireno expandido extrudido (XPS) pelo exterior; - Isolar termicamente a cobertura, com aplicação de placas de 7 cm de XPS sobre a laje de cobertura; - Isolar termicamente o pavimento em contacto com a zona não útil, com aplicação de placas de 7 cm de XPS sob a laje de pavimento; - Renovação dos vãos envidraçados: caixilharia em PVC e vidro duplo (6 mm + 5 mm); - Dispositivos de proteção solar exteriores: sistema de portadas em PVC e palas horizontais colocadas nos vãos envidraçados a sul; - Renovação do esquentador como dispositivo de apoio para preparação de AQS; - Introdução de um sistema de aquecimento que corresponde ao sistema por defeito definido pelo REH. - Introdução de um sistema de arrefecimento que corresponde ao sistema por defeito definido pelo REH. - Introdução de um sistema solar térmico com painéis solares planos de modelo padrão do REH; |

| | |
|-------------|---|
| nZEB | <p>As mesmas intervenções da renovação Base, exceto os equipamentos e o sistema solar:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Introdução de um sistema de ar condicionado do tipo <i>multi-split</i> para aquecimento e arrefecimento do edifício; - Introdução de um sistema solar térmico de coletores solares de tubos de vácuo. |
| ZEB | <p>As mesmas intervenções da renovação ZEB, adicionando:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Colocação de painéis solares fotovoltaicos. |

4.3.1 Soluções construtivas

Tal como apresentado no Capítulo 3.2 “Análise das necessidades energéticas”, foram definidas soluções construtivas para os elementos da envolvente exterior do edifício de forma a que estas cumpram os requisitos mínimos impostos pelo regulamento, sendo estes suficientes para aumentar consideravelmente a eficiência energética do edifício. Desta forma, foram utilizadas as mesmas soluções construtivas de pavimento, paredes exteriores, cobertura, vãos opacos exteriores e vãos envidraçados para todos os cenários de reabilitação.

a) Paredes exteriores

Entre 1961 e 1990 não era usual a implementação de materiais de isolamento térmico nos edifícios. Sendo esta uma grande preocupação devido às perdas térmicas que acontecem pela envolvente, definiu-se como solução para a fachada do edifício, a colocação de um sistema ETICS (*External Thermal Insulation Composite Systems*). Aos materiais existentes, foram acrescentados a argamassa de colagem, as placas de XPS de 5 cm de espessura, uma rede de fibra de vidro, reboco, primário de regularização e tinta para o acabamento.

b) Cobertura

A cobertura em estudo é inclinada e o desvão é não-habitável, o que torna possível a colocação do isolamento térmico na laje, pois, comparativamente à colocação nas vertentes, a área a isolar é menor assim como o volume a climatizar, tornando esta opção mais económica. De modo a reduzir o risco de condensações na estação de arrefecimento e a não diminuir a inércia térmica optou-se por dispor o isolamento térmico sobre a laje. Foram aplicadas a argamassa de colagem

e as placas de XPS com 7 cm de espessura, sob uma camada de betonilha de regularização de 2 cm. Foi considerado também a renovação das telhas cerâmicas na reabilitação da cobertura.

c) Pavimento

Como visto no quadro resumo, o pavimento está em contacto com um espaço não útil que se considera ser uma “caixa de ar”, mas com dimensões que, segundo a norma, obrigam a ser considerado como espaço não útil. A laje de pavimento está, portanto, a separar um espaço útil de um espaço não útil, o que torna necessário isolar este elemento. Admitiu-se a mesma espessura de XPS utilizada na cobertura e 3 cm de camada de regularização.

d) Vãos envidraçados e vãos opacos exteriores

A envolvente envidraçada existente no edifício era constituída por caixilharia em alumínio sem corte térmico e vidro simples, pelo que se prevê que apresente um mau comportamento térmico. Para a reabilitação foram selecionados envidraçados com caixilharia em PVC e com vidro duplo (vidro exterior com 6 mm, caixa de ar de 16 mm preenchida com ar atmosférico e vidro interior de 5 mm). Os dispositivos de proteção solar exteriores são do tipo portadas em PVC de cor clara. As palas de sombreamento horizontais, implementadas nos envidraçados a sul para minimizar a incidência de luz solar durante a estação de arrefecimento, são produzidas em alumínio e inclinadas a 45°.

Na definição do caso de estudo não é mencionado qualquer vão opaco exterior e, portanto, assumiu-se a existência de uma única porta com área de 1.8 m², composta por madeira densa e isolamento térmico de XPS entre as camadas exteriores de madeira.

e) Ventilação

A renovação do ar no interior do edifício é realizada através de ventilação natural, considerando aberturas de admissão de ar na fachada, reguláveis manualmente, cuja área livre das aberturas completa 350 cm². Acrescenta-se ainda, que a existência de janelas permite também a ventilação das frações do edifício e a possibilidade de efetuar arrefecimento noturno.

4.3.2 Equipamentos técnicos

a) Cenário Base

No cenário de renovação base os equipamentos de climatização e preparação de AQS utilizados foram os mesmos considerados para o cenário sem renovação. Isto é, um ar condicionado *split* para arrefecimento, radiadores elétricos para aquecimento e um esquentador para produção de AQS, este último, neste caso, funciona como sistema de apoio (ver Tabela 4.4). A preparação de AQS é realizada pela combinação de dois sistemas, ou seja, quando o sistema solar térmico (sistema principal) não conseguir produzir calor suficiente para aquecer a água, o esquentador (sistema de apoio) é ativado.

Não há alteração de equipamentos técnicos entre o cenário sem reabilitação e o Base, uma vez que se pretende, comparando-os, estudar a influência da alteração da envolvente no comportamento térmico do edifício.

Tabela 4.4 - Equipamentos técnicos aplicados à renovação Base

| Função | Equipamento | Eficiência | Parcela de necessidades atendidas (%) |
|-------------------------|-----------------------|-------------------|--|
| Aquecimento | Radiador elétrico | 1 | 100 |
| Arrefecimento | Ar condicionado split | 3 | 100 |
| Produção de AQS (apoio) | Esquentador | 0.89 | 32 |

A regulamentação exige a introdução de um sistema solar térmico nas grandes reabilitações de edifícios. Dessa forma foi calculada a quantidade de painéis de modelo padrão do REH que seria necessária para uma habitação de tipologia T3, com 4 ocupantes que consomem diariamente 40 litros de águas quentes sanitárias cada um. Os resultados da simulação estão representados na Tabela 4.5. Optou-se pela colocação dos coletores na cobertura da habitação.

A características principais de cada coletor padrão incluem a área de abertura de 0,65 m², inclinação de 35°, coeficientes de perdas térmicas $a_1 = 4,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $a_2 = 0,014 \text{ W/m}^2\text{K}^2$ e um rendimento ótico de 73%.

Tabela 4.5 - Resultados da simulação de desempenho do sistema solar térmico: requisitos mínimos do REH

| | |
|--|------|
| Número de coletores | 4 |
| Área de coletores (m ²) | 2,60 |
| Produtividade (Kwh/m ²) | 557 |
| Rendimento (%) | 40 |
| Perdas (%) | 35 |
| Energia útil de origem solar (Kwh/ano) | 1449 |
| Parcela de necessidades atendidas (%) | 68 |
| Capacidade do depósito (L) | 160 |

b) Cenário nZEB

O cenário nZEB compreende a introdução de equipamentos técnicos mais eficientes que permitem reduzir o consumo de energia. Este cenário propõe que o edifício melhore o seu desempenho energético em cerca de 80% relativamente ao cenário sem reabilitação, o que é esperado que aconteça com as alterações na envolvente já referidas e a introdução de equipamentos com eficiência energética elevada (ver Tabela 4.6).

Tabela 4.6 - Equipamentos técnicos aplicados à renovação nZEB e ZEB

| Função | Equipamento | Eficiência | Parcela de necessidades atendidas (%) |
|-------------------------|---|------------|---------------------------------------|
| Aquecimento | Sistema multi-split: - 1 unidade exterior; - 4 unidades interiores. | 3.80 | 100 |
| Arrefecimento | | 5.10 | 100 |
| Produção de AQS (apoio) | Bomba de calor (ar-água) | 4.30 | 8 |

A bomba de calor, neste caso, serve de apoio à instalação solar, entrando em funcionamento apenas quando é necessária. O sistema selecionado tem uma capacidade de armazenamento de 260 litros de água.

Nesta solução de reabilitação foi selecionado um painel solar de tubos de vácuo, devido à elevada produtividade e ao menor impacte ambiental de ciclo de vida, quando comparado com os painéis solares planos (Lamnatou et al., 2015). Optou-se por eleger um coletor solar térmico da marca *Zantia* com área de abertura 2,79 m², coeficientes de perdas térmicas $a_1 = 1,53 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $a_2 = 0,016 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e rendimento ótico de 73% (ver Tabela 4.7).

Tabela 4.7 - Resultados da simulação de desempenho do sistema solar térmico de tubos de vácuo

| | |
|--|------|
| Número de coletores | 1 |
| Área de coletores (m ²) | 2,79 |
| Produtividade (Kwh/m ²) | 704 |
| Rendimento (%) | 51 |
| Perdas (%) | 31 |
| Energia útil de origem solar (Kwh/ano) | 1964 |
| Parcela de necessidades atendidas (%) | 92 |

c) Cenário ZEB

Este cenário integra todos os equipamentos e sistemas indicados para o cenário anterior. A única alteração está na adição de um sistema solar fotovoltaico capaz de produzir tanta ou mais energia do que a necessária para aquecer, arrefecer e preparar as águas quentes do edifício.

Não se pretende com este sistema fornecer diretamente ao edifício energia suficiente para todas as necessidades descritas, ou seja, não se pretende que toda a energia produzida seja utilizada para autoconsumo, pois isso implicaria uma área considerável de painéis fotovoltaicos ou então a utilização de baterias para armazenamento da energia produzida nas horas em que não há consumo.

A finalidade deste sistema é produzir a quantidade de energia capaz de satisfazer as necessidades do edifício, de forma a que o impacte ambiental causado pela importação de energia da rede pública seja abatido pela mesma quantidade de energia produzida no edifício a partir dos painéis fotovoltaicos. Assim, conforme o exposto, à exceção da energia utilizada para

o autoconsumo do edifício, a restante é exportada para a rede pública, de forma a que o balanço energético gerado entre as fontes de energia renovável e a energia fornecida pela rede pública seja nulo.

O sistema fotovoltaico compreende 8 módulos fotovoltaicos da marca *Schiuco* que perfazem uma área 12,9 m² com inclinação de 35° e orientação 0° Sul. Acrescenta-se ainda que a potência nominal da instalação é de 1,8 kW. Os resultados da simulação do sistema solar fotovoltaico encontram-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resultados da simulação do sistema solar fotovoltaico

| | |
|---|------|
| Número de módulos fotovoltaicos | 8 |
| Área de coletores (m ²) | 12.9 |
| Produtividade técnica (Kwh/m ²) | 130 |
| Rendimento relativo (%) | 89 |
| Produção disponível (Kwh/ano) | 1671 |
| Autoconsumo (Kwh/ano) | 289 |

4.3.3 Propriedades do edifício em estudo antes e após as reabilitações

Como já foi referido anteriormente, as intervenções ao nível da envolvente de cada cenário de reabilitação são as mesmas, e por essa razão, uma vez que as propriedades apresentadas dependem apenas dos elementos da envolvente, os resultados serão apresentados apenas para o caso do edifício sem intervenção e do edifício intervencionado.

Assim, nas tabelas 4.9 e 4.10 estão apresentados os coeficientes de transmissão térmica dos elementos que constituem a envolvente do edifício, assim como os coeficientes de transmissão térmica lineares para o caso do edifício original e para o caso dos cenários de reabilitação. Além disso estão representados também os valores máximos que os coeficientes podem adotar de acordo com a Portaria n.º 379-A/2015.

Tabela 4.9 - Propriedades do edifício antes e após a reabilitação

| Propriedades | Edifício sem intervenção | Edifício reabilitado | Valores máximos regulamentares |
|--|--------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Coeficiente de transmissão térmica [W/(m ² .°C)] | | | |
| U (Paredes exteriores) | 1,76 | 0,47 | 0,50 |
| U (Cobertura) | 2,80 | 0,35 | 0,40 |
| U (Pavimento) | 2,10 | 0,39 | 0,40 |
| U _{wdn} (Vãos envidraçados) | 4,10 | 2,70 | 2,80 |
| U (Porta) | 2,31 | 0,49 | 0,50 |
| Coeficiente de transmissão térmica linear [W/(m ² .°C)] | | | |
| Ψ (Fachada/Pavimento) | 0,70 | 0,50 | 0,50 |
| Ψ (Fachada/Cobertura) | 0,70 | 0,70 | 0,50 |
| Ψ (Fachada/Fachada) | 0,50 | 0,40 | 0,40 |
| Ψ (Fachada/Caixilharia) | 0,25 | 0,10 | 0,20 |

Tabela 4.10 - Características dos vãos envidraçados

| | Tipo vidro | Fg | g _{lvi} | g _{lvc} | U _{wdn} | U _{máx} |
|------------------|------------|------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Sem reabilitação | Simples | 0,70 | 0,85 | 0,10 | 4,10 | 2,80 |
| Com reabilitação | Duplo | 0,65 | 0,75 | 0,04 | 2,70 | |

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 Resultados do Desempenho energético de ciclo de vida

Os resultados do balanço energético de cada cenário estudado apresentados neste capítulo foram simulados na folha de cálculo do ITeCons, que aplica a metodologia do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (ITeCons, 2016). As necessidades energéticas foram calculadas tendo em conta a climatização das frações do edifício e a preparação de águas quentes sanitárias.

O consumo de energia final de cada sistema de aquecimento, arrefecimento e preparação de AQS, está representado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Consumo de energia anual de cada equipamento técnico

| Cenário | Consumo de Energia Final (kWh/ano) | | |
|------------------|------------------------------------|---------------|---------|
| | Aquecimento | Arrefecimento | AQS |
| Sem reabilitação | 13452,08 | 306,37 | 2671,11 |
| Base | 5414,38 | 253,12 | 775,91 |
| nZEB e ZEB | 1424,84 | 138,21 | 40,83 |

É notória a redução dos consumos energéticos de uns cenários para os outros. Entre os dois primeiros cenários verifica-se uma redução de quase 61% do consumo de energia, resultante da colocação de isolamento térmico na envolvente e alteração dos vãos exteriores. A seleção de equipamentos técnicos mais eficientes nos cenários nZEB e ZEB levou a uma redução de 75% dos consumos energéticos relativamente à renovação Base e de 90% em comparação com o edifício existente.

Os sistemas solares foram implementados nos cenários de forma a ajudar a satisfazer estes consumos, com recurso a energia renovável produzida *in situ*. A Tabela 5.2 indica a quantidade de energia renovável que é produzida no próprio edifício, em cada cenário estudado.

Tabela 5.2 - Energia produzida a partir de fontes renováveis

| Cenário | Energia solar térmica | Energia solar fotovoltaica | |
|---------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|
| | E_{ren} (kWh/ano) | E_{ren} (kWh/ano) | $E_{ren,ext}$ (kWh/ano) |
| Base | 1449 | 0 | 0 |
| nZEB | 1964 | 0 | 0 |
| ZEB | 1964 | 289 | 1382 |

A implementação dos sistemas solares traduz-se numa redução significativa dos consumos de energia provenientes de fontes não-renováveis. No caso da renovação base, seriam consumidos 2404 kWh/ano de gás natural, ao invés dos 776 kWh/ano que são consumidos com a integração do painel solar térmico. Nas restantes renovações, são poupados 457 kWh/ano de eletricidade em preparação de AQS, pela aplicação do sistema solar em vez da utilização de uma bomba de calor como único sistema AQS. No que diz respeito ao cenário ZEB, o sistema solar fotovoltaico produz 1671 kWh/ano, o suficiente para compensar as necessidades de aquecimento, arrefecimento e preparação de AQS pelo sistema de apoio. A simulação da taxa

de renovação de ar no interior dos edifícios resultou em 0,86 renovações por hora, tanto na estação de aquecimento como na estação de arrefecimento.

As necessidades de energia referentes ao aquecimento, arrefecimento e preparação de AQS da habitação, são apresentados na Tabela 5.3 para cada cenário, antes e após as reabilitações. Além disso, estão também indicados os valores de referência de cada indicador energético em conformidade com o REH, para edifícios novos.

Tabela 5.3 -Balanço energético de cada cenário

| Cenário | N _{ic} (kWh/ m ² .ano) | N _i (kWh/ m ² .ano) | N _{vc} (kWh/ m ² .ano) | N _v (kWh/ m ² .ano) | Q _a (kWh/ ano) | N _{tc} (kWh _{EP} / m ² .ano) | N _t (kWh _{EP} / m ² .ano) |
|------------------|--|---|--|---|---------------------------------|---|--|
| Sem reabilitação | 134,52 | 60,52 | 9,19 | 9,13 | 2377,00 | 370,67 | 185,62 |
| Base | | | | | | | 149,45 |
| nZEB | 54,14 | | 7,05 | | 2140,00 | 40,10 | 73,34 |
| ZEB | | | | | | 32,87 | 73,34 |

Analisando a Tabela 5.3 observa-se uma redução da energia primária em cada cenário comparado com o anterior, tal como era esperado. A reabilitação Base, nZEB e ZEB apresentam uma redução de energia primária de aproximadamente 60%, 89% e 91% respetivamente, em relação ao edifício sem reabilitação.

O cenário correspondente ao edifício ZEB, de acordo com a simulação da folha de cálculo tem um consumo de energia primária de 32.87 kWh_{EP}/m².ano, uma vez que este cálculo não inclui a energia exportada que é produzida no edifício. No entanto, como a energia primária não renovável consumida pelo edifício é devolvida à rede pública como energia renovável, pode considerar-se que o consumo de energia primária neste cenário é nulo, alegando uma redução de energia primária de 100% relativamente ao edifício inicial.

Relativamente ao edifício nZEB, tendo em conta que o seu conceito corresponde a uma redução de cerca de 80% de energia comparando com o edifício inicial, verifica-se que a solução adotada supera esse valor.

Verifica-se também, que o valor de Nic do edifício existente é bastante elevado o que pode ser explicado pela falta de isolamento térmico na envolvente e pelas más características térmicas dos vãos envidraçados, que permitem grandes perdas de calor para o exterior na estação de arrefecimento, sendo necessária uma grande quantidade de energia para aquecer o edifício.

Na estação de aquecimento, a situação é similar, pois as condições da envolvente permitem ganhos de calor no interior do edifício levando ao seu sobreaquecimento, no entanto comparando o valor de Nic resultante e o atual de referência, a discrepância é mínima.

Por outro lado, os resultados das simulações dos cenários reabilitados apresentam valores de Nic e Nvc dentro do limite regulamentar para edifícios novos, traduzindo as melhorias proporcionadas pelas alterações realizadas nos elementos construtivos do edifício. As necessidades de energia útil da estação de arrefecimento foram ainda influenciadas pela colocação de palas horizontais nos envidraçados a sul que asseguram a diminuição da radiação solar que entra no edifício.

A diferença de valores da energia útil para preparação de água quente sanitária nos cenários nZEB e ZEB comparando com os cenários Base e não reabilitado, deve-se ao facto de ser considerado que, nos primeiros, os sistemas de duche possuíam certificado de eficiência hídrica com rótulo A ou superior.

O cálculo das necessidades de energia primária é influenciado não só pelas necessidades de energia útil, como também pela eficiência nominal dos equipamentos requeridos. Atendendo a que as necessidades de energia útil para aquecimento, arrefecimento e preparação de AQS se mantêm da renovação Base para a nZEB, apenas o aumento da eficiência dos equipamentos técnicos influenciou os resultados. Assim, é possível constatar que, com esta alteração, os valores desceram de forma significativa, demonstrando que a utilização de equipamentos com elevada eficiência nominal reduz bastante os consumos energéticos de um edifício.

Apesar dos valores das necessidades energéticas se encontrarem dentro dos limites máximos impostos para edifícios de habitação novos, de acordo com o regulamento, os edifícios existentes sujeitos a grandes intervenções não têm que cumprir esse requisito, mas sim, cumprir os valores estipulados para a relação entre os valores das necessidades nominais e limite de energia útil para aquecimento, arrefecimento e energia primária, já indicados na Figura 3.2 do Capítulo 3 - “Metodologias de investigação”.

Desta forma, tendo em conta que os valores das necessidades de energia cumprem os requisitos para edifícios novos que são mais rigorosos, também cumprem as exigências para edifícios existentes sujeitos a grande intervenção, como se pode observar na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Relação entre as necessidades nominais e limite do edifício em estudo

| Cenário | N_{ic} / N_i | N_{vc} / N_v (limite) | N_{vc} / N_v | N_{vc} / N_v (limite) | N_{tc} / N_t | N_{tc} / N_t (limite) |
|----------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|
| Base | 0,89 | 1,25 | 0,77 | 1,25 | 0,81 | 1,50 |
| nZEB | | | | | 0,55 | |
| ZEB | | | | | 0,45 | |

5.2 Resultados do Desempenho ambiental de ciclo de vida

No presente capítulo são descritos e discutidos os resultados da avaliação do impacte ambiental dos diferentes cenários considerados para o edifício em estudo, de acordo com os indicadores de impacte listados na secção 3.3.3 na Tabela 3.3.

5.2.1 Impactes ambientais de ciclo de vida

Tendo como objetivo a quantificação dos impactes ambientais de ciclo de vida de cada cenário, é necessário calcular a quantidade de materiais, sistemas e energia que entram e saem do edifício para cada cenário de renovação, durante o tempo de vida considerado. Esses resultados estão apresentados na Tabela 5.5, divididos por cada fase de ciclo de vida do edifício.

Tabela 5.5 - Inventário de ciclo de vida para cada cenário

| Cenários | Produtos de construção/ Sistemas/ Energia | Quantidade | Unidade | |
|----------------------------------|---|---|----------------|-----|
| Fase de produção (Módulos A1-A3) | | | | |
| Sem renovação | Tinta utilizada para pintar o exterior das fachadas. | 164,16 | Kg | |
| Renovação base | Igual ao cenário sem renovação, adicionado de: | | | |
| | Paredes exteriores | Placas de isolamento de XPS (5 cm de espessura) | 168,72 | Kg |
| | | Argamassa de colagem | 383,04 | |
| | | Reboco para ETICS | 1550,40 | |
| | | Rede de fibra de vidro | 14,59 | |
| | | Reboco | 1732,80 | |
| | Cobertura | Argamassa de colagem | 420,00 | Kg |
| | | Placas de isolamento de XPS (7 cm de espessura) | 259,00 | |
| | | Betonilha de regularização | 1900,00 | |
| | | Telha cerâmica | 4375,00 | |
| Pavimento | Argamassa de colagem | 700,00 | Kg | |
| | Placas de isolamento de XPS (7 cm de espessura) | 259,00 | | |
| | Betonilha de regularização | 3800,00 | | |
| | Revestimento cerâmico | 1150,00 | | |
| Vãos envidraçados | Caixilho em PVC | 4,50 | m ² | |
| | Vidro duplo | 10,50 | | |
| | Dispositivos de proteção solar exteriores | 15,00 | | |
| Equipamentos | Esquentador | 1 | Un. | |
| | Unidades split para arrefecimento | 4 | | |
| | Radiadores elétricos para aquecimento | 4 | | |
| Sistema solar | Sistema solar térmico, com 4 painéis solares planos padrão. | 1 | Un. | |
| Renovação nZEB | Igual à renovação base, com as seguintes alterações: | | | |
| | Equipamentos | Sistema de climatização multi-split: | | Un. |
| -Unidade exterior | | 1 | | |
| -Unidade interior | | 4 | | |
| | Bomba de calor para produção de AQS. | 1 | | |

| | | | | |
|--------------------------------------|--|---|---------------------------------------|---------|
| | Sistema solar | Sistema solar térmico, com 1 painel solar de tubos de vácuo; | 1 | Un. |
| Renovação ZEB | Igual à renovação nZEB, adicionado de: | | | |
| | Sistema solar | Sistema solar fotovoltaico com 8 painéis. | 1 | Un. |
| Fase de construção (Módulos A4 e A5) | | | | |
| Sem renovação | Não inclui transporte de materiais para o edifício, assim como processos de instalação. | | | |
| Renovação base | Trabalhos de instalação do sistema de painéis solares térmicos. Não inclui transporte de materiais para o edifício. | | | |
| Renovação nZEB | Trabalhos de instalação do sistema de painéis solares térmicos. Não inclui transporte de materiais para o edifício. | | | |
| Renovação ZEB | Trabalhos de instalação do sistema de painéis solares térmicos e do sistema de painéis solares fotovoltaicos. Não inclui transporte de materiais para o edifício. | | | |
| Fase de utilização (Módulos B1-B7) | | | | |
| Sem renovação | Paredes | Tinta utilizada para pintar o exterior das fachadas (pintura realizada de 8 em 8 anos). | 31,75 | Kg |
| | Energia | Energia para: - Aquecimento - Arrefecimento - Preparação de AQS | 13452,08 306,37 2671,11 | kWh/ano |
| Renovação base | Igual ao cenário sem renovação, adicionado de: | | | |
| | Sistema solar | Renovação do sistema de painéis solares térmicos (em cada 20 anos) Produtos usados na manutenção dos painéis solares térmicos | 1 - | Un. |
| | Energia | Energia para: - Aquecimento - Arrefecimento - Preparação de AQS Energia necessária para a manutenção dos painéis solares térmicos | 5414,38 253,12 1043,02 87,20 | kWh/ano |

| | | | |
|---|---|---|-------------------------------------|
| Renovação nZEB | Igual ao cenário de renovação base, à exceção de: | | |
| | Energia | Energia para: - Aquecimento - Arrefecimento - Preparação de AQS Energia necessária para a manutenção dos painéis solares térmicos | 1424,84 138,21 40,83 49,96 |
| Renovação ZEB | Igual ao cenário de renovação nZEB. | | |
| Fase de fim de vida (Módulos C1-C4) | | | |
| Sem renovação | Não considerado. | | |
| Renovação base | Não considerado. | | |
| Renovação nZEB | Não considerado. | | |
| Renovação ZEB | Não considerado. | | |
| Benefícios fora dos limites do sistema (Módulo D) | | | |
| Sem renovação | Nenhum. | | |
| Renovação base | Nenhum. | | |
| Renovação nZEB | Nenhum. | | |
| Renovação ZEB | Eletricidade produzida pelos painéis fotovoltaicos exportada para a rede pública. | | |

A informação presente na Tabela 5.5 foi inserida no programa *Simapro*, que converteu estes valores em potenciais impactes ambientais. Os impactes totais anuais de ciclo de vida de cada cenário do edifício estão indicados na Tabela 5.6, assim como o potencial de melhoria de cada indicador ambiental que cada reabilitação apresenta em relação ao edifício existente. Os impactes correspondentes aos benefícios externos ao sistema, na renovação ZEB, equivalem à energia produzida pelos painéis fotovoltaicos que é injetada na rede pública.

Tabela 5.6 - Impactes ambientais anuais de ciclo de vida e potenciais de melhoria ambiental de cada indicador

| Indicador ambiental | Sem renovação | Renovação Base | | Renovação nZEB | | Renovação ZEB | | | |
|----------------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------|
| | Impactes (/ano) | Impactes (/ano) | Melhoria (%) | Impactes (/ano) | Melhoria (%) | Impactes internos do sistema (/ano) | Benefícios externos ao sistema | Impactes (/ano) | Melhoria (%) |
| ADP_elements | 4,85E-01 | 5,49E-01 | -13% | 4,41E-01 | 9% | 6,97E-01 | 3,80E-02 | 6,59E-01 | -36% |
| ADP_FF | 1,20E+05 | 5,96E+04 | 50% | 1,84E+04 | 85% | 1,94E+04 | 1,30E+04 | 6,40E+03 | 95% |
| GWP100a | 9,06E+03 | 4,63E+03 | 49% | 1,46E+03 | 84% | 1,54E+03 | 9,93E+02 | 5,52E+02 | 94% |
| ODP | 2,78E-03 | 1,39E-03 | 50% | 2,24E-03 | 19% | 2,26E-03 | 7,14E-05 | 2,19E-03 | 21% |
| POCP | 2,83E+00 | 1,44E+00 | 49% | 4,65E-01 | 84% | 4,98E-01 | 3,17E-01 | 1,81E-01 | 94% |
| AP | 6,82E+01 | 3,33E+01 | 51% | 1,01E+01 | 85% | 1,08E+01 | 7,85E+00 | 2,92E+00 | 96% |
| EP | 1,71E+01 | 8,78E+00 | 49% | 3,05E+00 | 82% | 3,43E+00 | 1,97E+00 | 1,46E+00 | 91% |
| CED _{NRE} | 1,29E+05 | 6,46E+04 | 50% | 2,02E+04 | 84% | 2,14E+04 | 1,41E+04 | 7,38E+03 | 94% |
| CED _{TOTAL} | 1,52E+05 | 7,61E+04 | 50% | 2,34E+04 | 85% | 2,48E+04 | 1,69E+04 | 7,90E+03 | 95% |

Analisando a tabela, constata-se que os cenários de reabilitação apresentam uma diminuição dos impactes ambientais, que se acentua desde o cenário Base até ao ZEB, como se pode confirmar pela percentagem de melhoria.

Todavia, a categoria de impacte ADP_elements que está relacionada com a quantidade de materiais extraídos, não tem o mesmo comportamento, sendo melhor no cenário nZEB. Esta categoria está relacionada com a quantidade de recursos abióticos utilizados nas renovações. À medida que se acrescenta ao edifício mais quantidade de material e mais sistemas, pior é o desempenho do edifício relativamente ao potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos.

Destaca-se também a evolução menos significativa da categoria ODP, que avalia o potencial de destruição da camada de ozono. A incorporação de bombas de calor tem um grande impacte ao nível desta categoria, o que explica as oscilações entre as diferentes renovações. O cenário

Base tem a mesma quantidade de bombas de calor do edifício sem renovação, portanto a melhoria de 50% deve-se à energia que é economizada. O mesmo não acontece no cenário nZEB, devido à adição de outra bomba de calor que tem um maior impacto nesta categoria do que a energia. O cenário ZEB apresenta 2% de melhoria relativamente ao nZEB nesta categoria, o que significa que, apesar de acrescentar o impacto da incorporação dos painéis solares fotovoltaicos, o facto do edifício consumir apenas energia renovável, compensa comparativamente ao cenário nZEB.

Conforme a equação 3.2 apresentada na secção 3.3.3, tendo em conta o peso definido para cada indicador ambiental (ver Figura 3.3), o potencial de melhoria de desempenho ambiental (Eli) que cada reabilitação apresenta comparativamente ao cenário inicial está indicado na Figura 5.1.

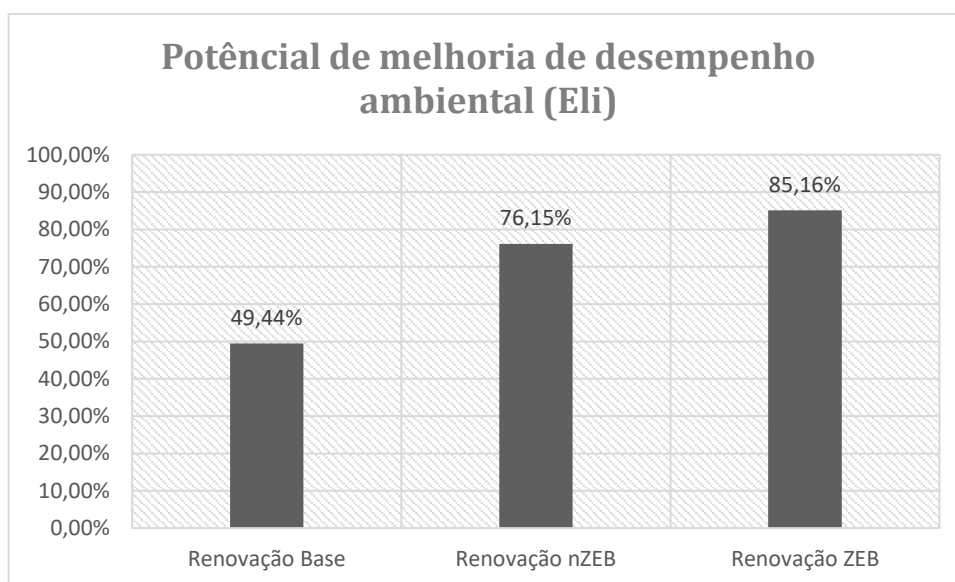


Figura 5.1 - Potencial de melhoria de desempenho ambiental (Eli) de cada cenário de renovação

Observando o gráfico, comprova-se o efeito benéfico que as medidas de melhoria provocam no ambiente. Verifica-se uma melhoria de 50% no cenário Base, que resulta apenas das modificações na envolvente do edifício que lhe proporcionaram melhores características térmicas e da integração de um sistema solar térmico que satisfaz 68% das necessidades de AQS.

A maior eficiência dos sistemas técnicos e solares implementados no cenário de renovação nZEB, originou uma melhoria no desempenho ambiental do edifício de quase 30%, em relação ao cenário anterior e de aproximadamente 80% comparando com o cenário sem renovação. Levando em consideração que o objetivo do cenário nZEB era reduzir em 80% as necessidades de energia primária do edifício, os resultados do estudo ambiental mostram uma boa correlação entre a redução das necessidades energéticas e a redução dos potenciais impactos ambientais globais.

Por último, com a incorporação de um sistema solar fotovoltaico que suprime todas as necessidades de aquecimento, arrefecimento e AQS do edifício, proporciona mais 9% de melhoria ao cenário ZEB em comparação com o nZEB, que corresponde a mais de 85% de benefício ambiental relativamente ao edifício sem reabilitação.

5.2.2 Tempo de retorno das emissões de carbono (GPBT)

A categoria de impacto ambiental com mais peso no desempenho ambiental global do edifício é o Potencial de Aquecimento Global (GWP). Desta forma, e tendo em conta a meta da UE de reduzir as emissões de carbono em 20% até 2020, entendeu-se pertinente analisar a evolução desta categoria de impacto ambiental, ao longo dos 30 anos de ciclo de vida considerados para todos os cenários de reabilitação do edifício.

O gráfico representado na Figura 5.2 mostra a acumulação das emissões de CO₂ de cada cenário, permitindo quantificar a quantidade de CO₂ que pode ser economizada e identificar o tempo de retorno deste gás em cada renovação, quando comparado ao edifício sem renovação.

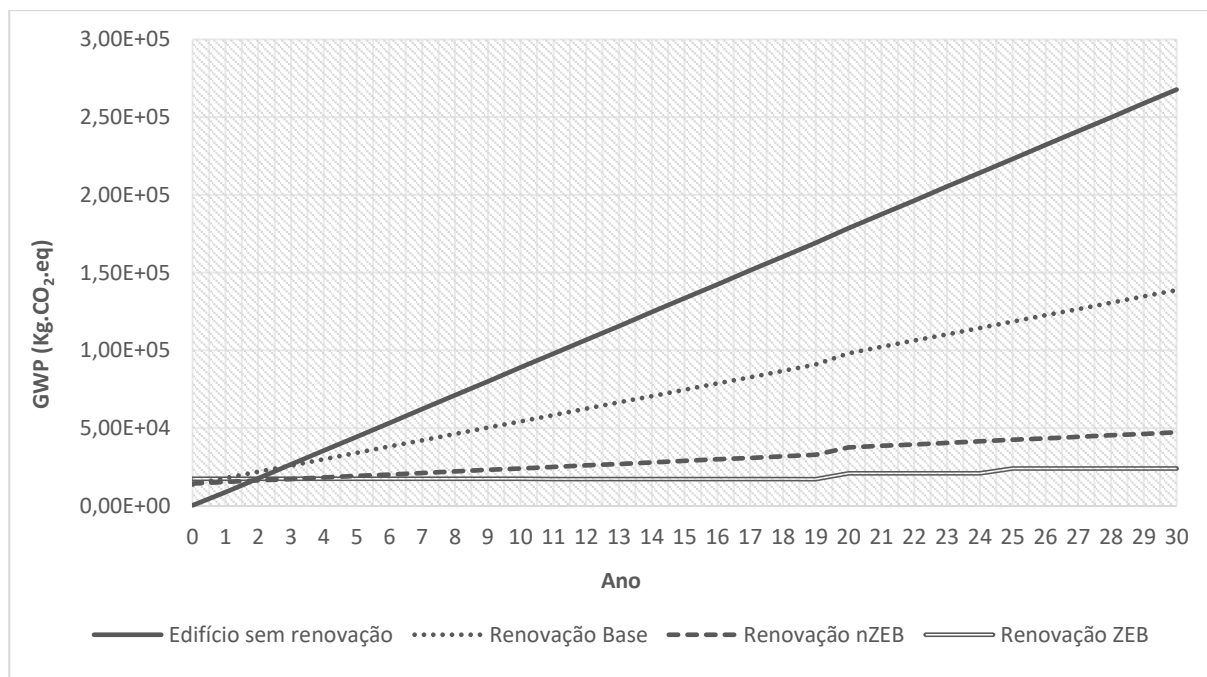


Figura 5.2 – Potencial de aquecimento global acumulado de cada cenário durante o ciclo de vida considerado

É visível o crescimento exponencial de emissões de CO₂ associadas à utilização e manutenção do edifício sem renovação. Apesar de nos restantes cenários existir, no ano 0, um aumento do potencial de aquecimento global devido às obras de reabilitação, este é bastante reduzido quando comparado com os benefícios associados à fase de utilização. Nas renovações é perceptível um ligeiro aumento no ano 20 e no ano 25, que corresponde, respetivamente, à substituição dos sistemas solares térmicos e do sistema solar fotovoltaico.

Comparando cada cenário de reabilitação com o cenário sem reabilitação, são produzidos menos 129 ton.CO₂.eq., 220 ton.CO₂.eq. e 244 ton.CO₂.eq. no cenário Base, nZEB e ZEB respetivamente.

A influência da energia renovável produzida a partir dos painéis fotovoltaicos é visível na série correspondente à renovação ZEB, que não apresenta acumulação de emissões de CO₂ ao longo dos anos. Apesar de não ser perfeitamente perceptível na figura, o declive mostra-se tenuemente menos acentuado de ano para ano no cenário ZEB, devido à perda de eficiência dos painéis fotovoltaicos.

Por fim, analisando a interseção das curvas das renovações com a curva do edifício sem renovação, é possível determinar o tempo de retorno das emissões de carbono (GPBT). O

cenário de renovação Base demora 3 anos a igualar as emissões de carbono do cenário sem renovação, o que mostra que as emissões de gases de efeito de estufa correspondentes às obras de reabilitação do edifício Base são compensadas após 3 anos. Os dois cenários de reabilitação restantes têm um GPBT muito próximo, que equivale a aproximadamente 2 anos, podendo assim comprovar-se que as emissões de CO₂ incorporadas nas renovações são facilmente compensadas pelas emissões evitadas com a economia de energia resultante do aproveitamento de energia renovável.

Atendendo à importância de compreender os benefícios ambientais e energéticos dos sistemas solares integrados nos cenários de reabilitação, uma vez que contribuem para a redução do consumo de energia não renovável, optou-se por estudar separadamente o Potencial de Aquecimento Global (GWP) acumulado de cada sistema solar para um período de vida de 20 anos.

A Figura 5.3 mostra o gráfico correspondente ao potencial de aquecimento global incorporado em cada equipamento solar, atendendo às emissões de dióxido de carbono que são evitadas durante a sua utilização.

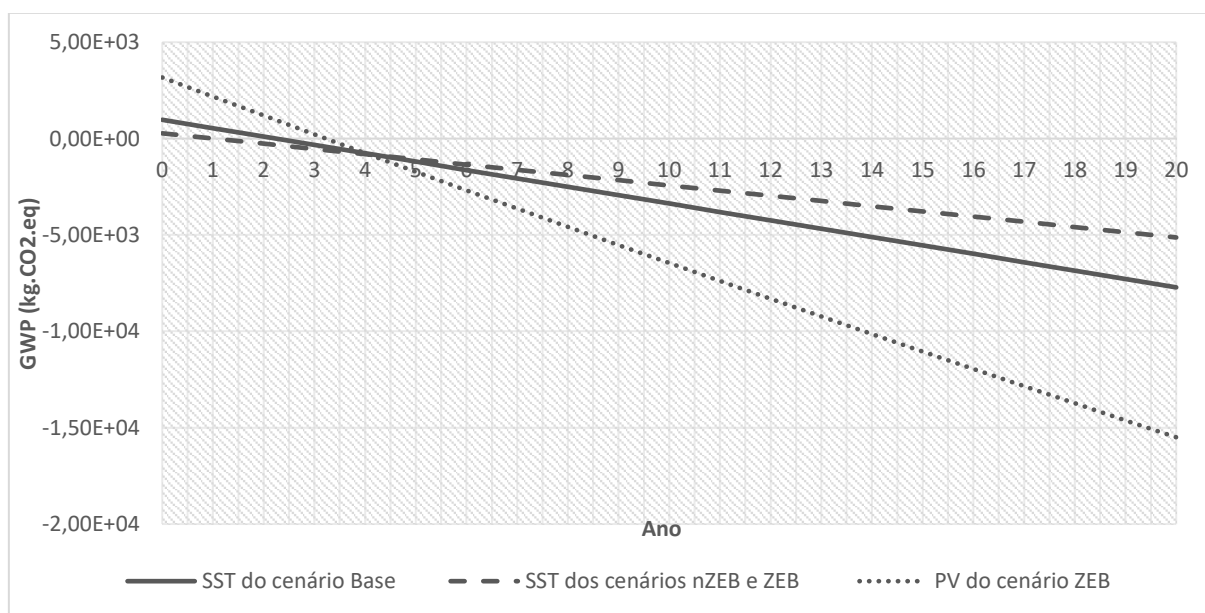


Figura 5.3 - Potencial de Aquecimento Global acumulado de cada sistema solar utilizado no caso de estudo

As emissões de CO₂ dos sistemas solares térmicos foram avaliadas tendo em consideração o consumo de gás natural (cenário Base) e de eletricidade (cenário ZEB e nZEB) que é evitado pela integração destes sistemas, quando comparado ao caso de serem usados para AQS apenas os equipamentos de apoio definidos para cada cenário. Na avaliação do sistema solar fotovoltaico, calcularam-se as emissões poupadas considerando que a quantidade de energia produzida pelo painel fotovoltaico seria produzida de acordo com o *mix* energético de Portugal.

O GPBT do sistema solar térmico padrão do REH, integrado na renovação base é de 2.24 anos (27 meses), enquanto que o do sistema solar de tubos de vácuo, das renovações ZEB e nZEB é de 1 ano (12 meses). Em relação ao sistema solar fotovoltaico, o tempo retorno das emissões de dióxido de carbono é de 3.22 anos (39 meses).

Compreende-se que, apesar do tempo de retorno energético do SST dos cenários nZEB e ZEB ser menor do que o SST do cenário Base, ao fim dos 20 anos, este último apresenta maior quantidade de emissões evitadas. Isto deve-se ao facto do sistema de apoio dos cenários ZEB e nZEB ser uma bomba de calor com eficiência bastante maior do que o esquentador integrado no cenário Base apresentando por si só, uma economia de energia elevada. Ou seja, enquanto que a diferença entre a quantidade de energia produzida pela bomba de calor sem sistema solar e a energia produzida quando funciona como apoio do sistema solar é de 466 kWh/ano, a mesma diferença com um esquentador é de 1628 kWh, explicando o motivo pelo qual o SST de coletores planos apresenta maior economia de emissões de CO₂.

5.2.3 Tempo de retorno energético (EPBT)

Este parâmetro permite identificar o período de tempo que os fluxos energéticos dos cenários de reabilitação demoram a igualar os do cenário sem reabilitação, de forma a estudar se o retorno energético existe ou não, e, no caso de existir, se é um retorno de curto prazo ou longo prazo.

No cálculo deste parâmetro são contabilizados todos os fluxos de energia de todas as fases de ciclo de vida do edifício consideradas neste estudo, desde a extração de matérias primas até à utilização e manutenção do edifício.

A Figura 5.4 exibe a acumulação da energia incorporada (CED_{TOT}) em cada cenário, que inclui a energia proveniente de fontes renováveis (energia da biomassa, eólica, solar, geotérmica e das ondas e marés) e a energia que provem de fontes não renováveis (energia fóssil, nuclear, biomassa).

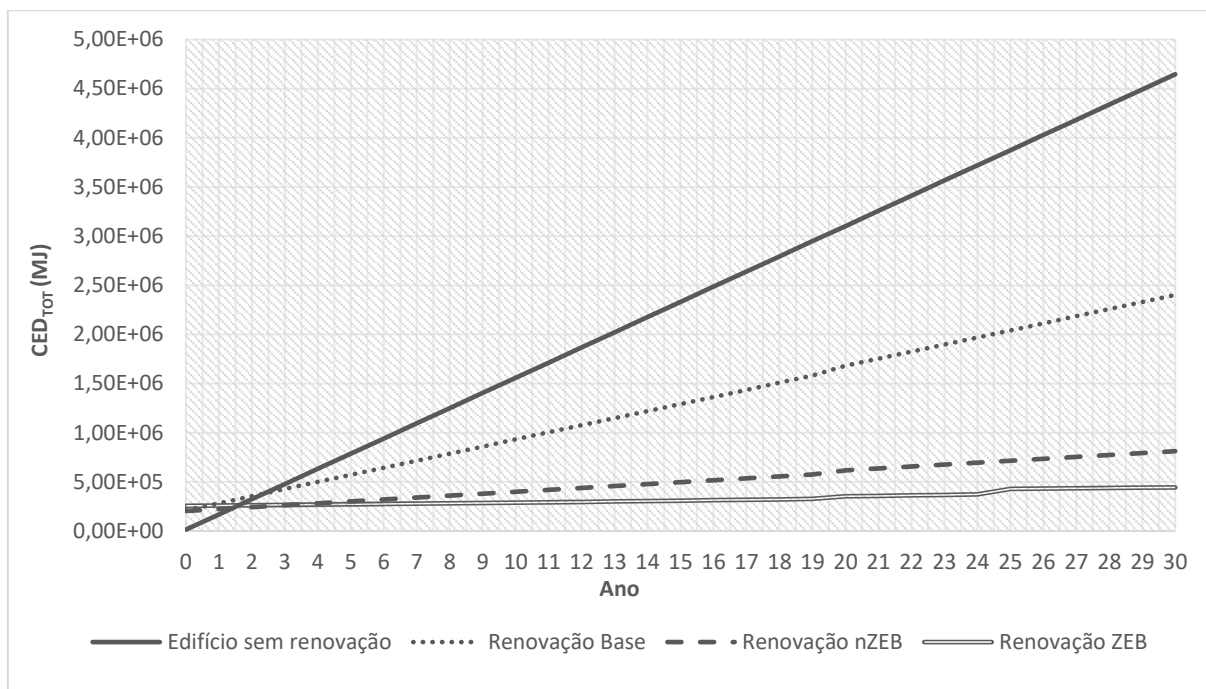


Figura 5.4 - Energia incorporada acumulada de cada cenário durante o ciclo de vida considerado

A evolução acumulativa da energia incorporada é semelhante à evolução das emissões de carbono, o que mostra que o consumo de energia do edifício tem uma grande influência nos potenciais impactos ambientais deste.

Observando o gráfico nota-se que o retorno energético é de curto prazo, uma vez que os tempos de retorno de energia são aproximadamente de 2,42 anos (29 meses) na renovação Base e de aproximadamente 1,5 anos (18 meses) nas renovações ZEB e nZEB. Além disso, verifica-se que ao fim de 30 anos, há uma redução da energia incorporada do edifício de 48%, 83% e 90% nos cenários Base, nZEB e ZEB respetivamente, quando comparados com o valor do cenário sem reabilitação.

Em relação ao tempo de retorno energético dos sistemas solares, está apresentado na Figura 5.5 o gráfico relativo à acumulação da energia incorporada em cada um dos sistemas.

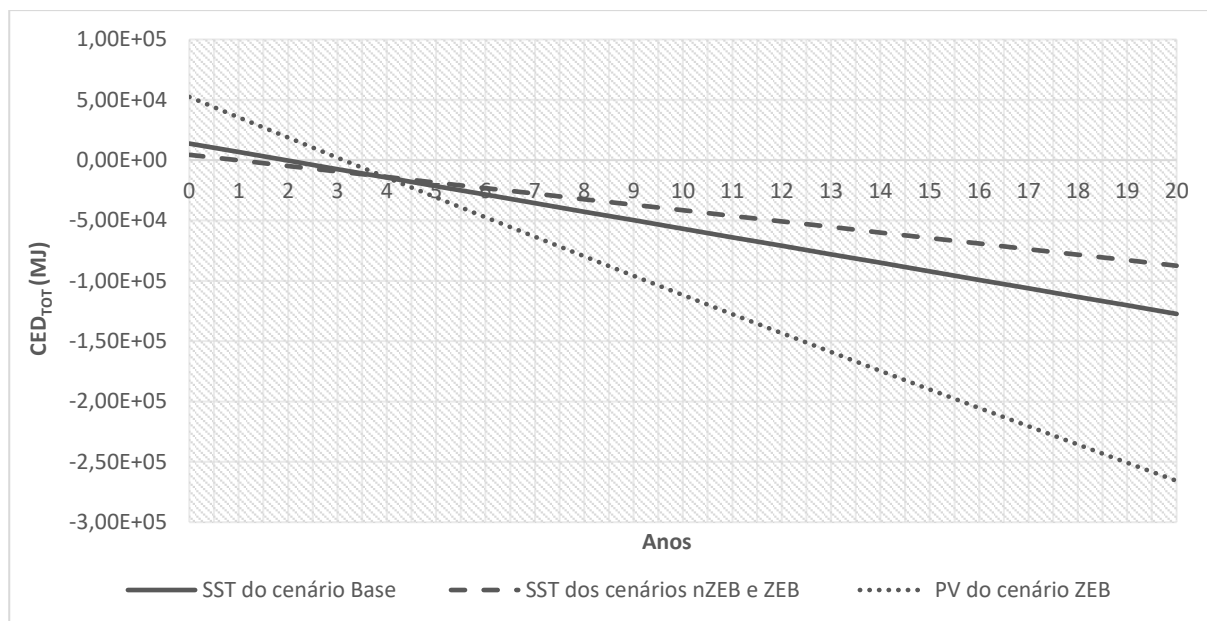


Figura 5.5 - Energia incorporada acumulada de cada sistema solar utilizado no caso de estudo

Os dados apresentados na Figura 5.5 indicam um tempo de retorno energético de 1.94 anos (23 meses), 0.95 anos (12 meses) e 3.12 (38 meses) no caso do SST do cenário base, SST dos cenários nZEB e ZEB e do sistema fotovoltaico, respetivamente.

Tal como no estudo do GWP dos sistemas solares, as conclusões relativas ao final dos 20 anos são as mesmas. Caso a diferença de consumos energéticos fosse a mesma, apesar da eletricidade ter um impacto maior do que o gás natural, o sistema de tubos de vácuo apresentaria maior poupança de CED_{TOT} do que o SST de coletores planos, tal como seria esperado devido ao menor impacto incorporado do primeiro sistema e principalmente ao maior rendimento deste.

No anexo I estão apresentados os valores correspondentes às emissões de CO_2 e ao CED_{TOT} incorporados nos sistemas solares, na manutenção e as emissões economizadas com a utilização destes.

5.3 Resultados do Desempenho económico de ciclo de vida

Atendendo à importância da avaliação dos custos de ciclo de vida de edifícios, são apresentados e discutidos, neste capítulo, os resultados do desempenho económico de cada cenário de estudo, de acordo com as considerações já referidas na metodologia.

Os valores detalhados dos custos de associados a cada cenário de renovação em estudo, correspondentes aos 30 anos de vida útil, encontram-se no Anexo II. Os custos anuais correspondentes a cada cenário de renovação, estão expostos no Anexo III.

A análise económica de cada cenário resultou nos custos apresentados na Tabela 5.7, resumidos por categorias de custo, incluindo o custo global de cada um.

Tabela 5.7 - Estimativa dos custos associados a cada cenário de estudo (€)

| Custos | Cenário sem renovação | Renovação Base | Renovação nZEB | Renovação ZEB |
|----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Investimento inicial | 7 366,00 | 26 142,00 | 30 706,00 | 34 702,00 |
| Substituição | 838,00 | 1 687,00 | 3 274,00 | 3 865,00 |
| Manutenção | 2 586,00 | 7 314,00 | 8 819,00 | 9 994,00 |
| Energia | 91 216,00 | 39 268,00 | 10 586,00 | 6 350,00 |
| Custo Global | 108 007,00 | 74 410,00 | 53 384,00 | 54 911,00 |

A partir destes valores, é possível constatar que, a nível económico, a renovação nZEB é a mais favorável. Face ao cenário inicial, as renovações Base, nZEB e ZEB representam uma redução de 31%, 51% e 49%, respetivamente, no custo global do edifício. Tal como previsto, a maior disparidade de valores entre os cenários reside nos custos com a energia. Neste contexto, pode afirmar-se que em todos os cenários de reabilitação, apesar de haver um investimento consideravelmente maior comparativamente ao cenário sem reabilitação, a economia de energia resultante das ações de reabilitação permitiu que o custo global de ciclo de vida diminuísse substancialmente.

Neste seguimento, considera-se relevante estudar a evolução dos custos de ciclo de vida ao longo do período de 30 anos, de forma a ser possível comparar o comportamento dos diferentes cenários.

Atendendo a este objetivo, foram produzidos os gráficos apresentados na Figura 5.6 e Figura 5.7, que mostram os custos acumulados de ciclo de vida de cada cenário, permitindo identificar o tempo de retorno económico de cada um.

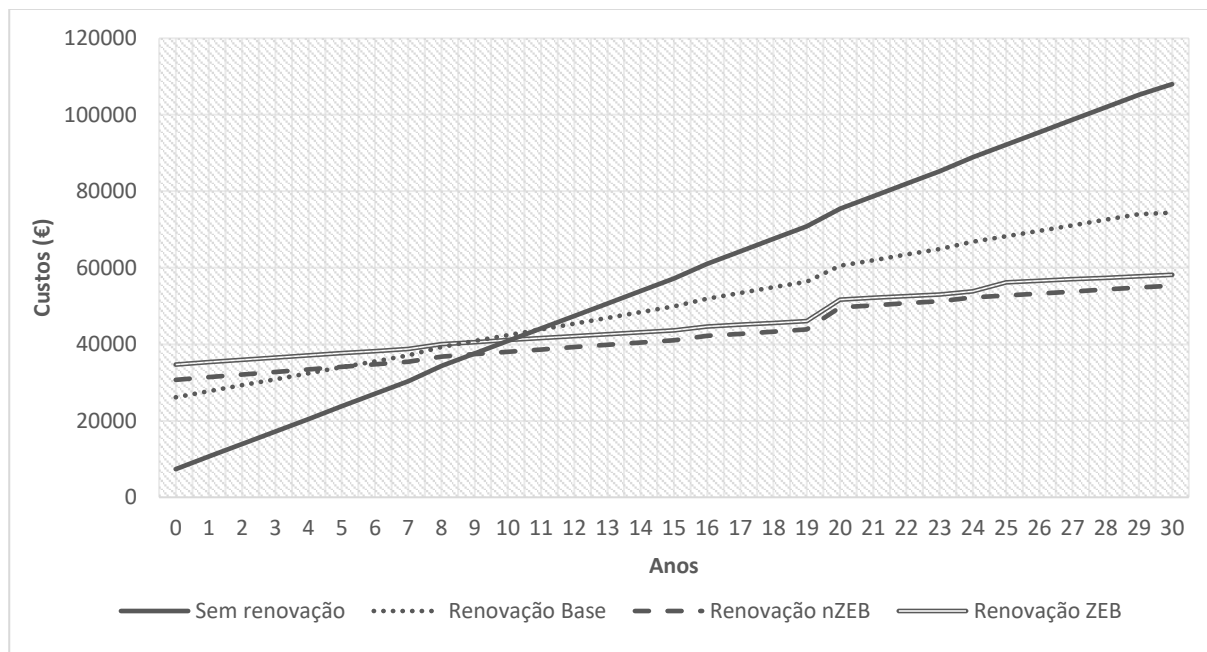


Figura 5.6 – Custos de ciclo de vida acumulados de cada cenário de reabilitação

A Figura 5.6 mostra que o retorno económico resultante das renovações Base, nZEB e ZEB acontece aproximadamente aos 11 anos, 9 anos e 10 anos, respetivamente.

Como se pode verificar pelo gráfico anterior e também pela Tabela 5.5, o cenário de renovação nZEB é o que apresenta melhor desempenho económico.

No cenário de renovação ZEB, o objetivo de colocação do sistema fotovoltaico é produzir a quantidade de energia necessária para as necessidades de aquecimento, arrefecimento e AQS da habitação, de forma a anular o impacto ambiental resultante de fontes de energia não renováveis. Como a ocupação dos edifícios ocorre maioritariamente nas horas em que não há exposição solar, a quantidade de energia utilizada para autoconsumo do edifício é baixa. Por essa razão optou-se por vender o excedente à rede pública, o que não se torna numa alternativa muito rentável devido ao baixo valor pago pelos Comercializadores de último recurso (CUR). Por essa razão, neste caso, a integração do sistema solar fotovoltaico não compensa a nível económico.

Os resultados do cenário ZEB apresentados na figura anterior, foram calculados para uma retribuição de 0.06€/kWh de eletricidade vendida à RESP, tal como acontece atualmente. No entanto, julgou-se pertinente estudar uma situação em que o custo de venda de eletricidade seria o mesmo que o custo de compra aos CUR. Desta forma, tendo em conta que este o custo da eletricidade adotado neste estudo é de 0.22€/kWh, considerou-se nesta análise, que a eletricidade excedente proveniente do sistema solar fotovoltaico seria vendida à RESP a esse valor (ver Figura 5.7).

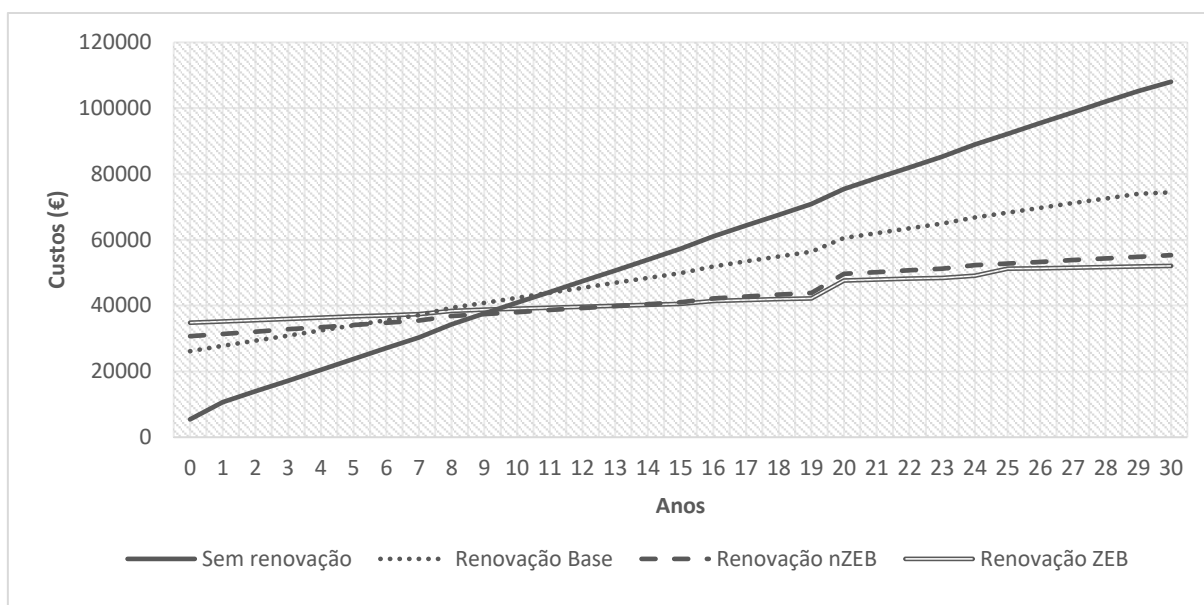


Figura 5.7 - Custos de ciclo de vida acumulados de cada cenário de reabilitação (situação adicional)

Avaliando a figura anterior, verifica-se que, no final da vida útil considerada, a renovação ZEB apresenta melhor desempenho económico. Neste sentido, é possível inferir que, caso o preço da eletricidade pago aos consumidores fosse equivalente ao preço de compra aos CUR, o investimento nos sistemas fotovoltaicos iria compensar, pois a partir dos 13 anos, ultrapassa o cenário nZEB.

5.4 Resultados para diferentes zonas climáticas

Com o objetivo de comparar os resultados para diferentes zonas climáticas, foram selecionadas as cidades de Vila Real e Beja como locais de implantação do edifício em estudo.

5.4.1 Desempenho energético

A zona climática de Vila Real revela um clima temperado mediterrânico, com temperatura média exterior de 8.2°C no inverno e 25.6°C no verão, segundo os dados climáticos de referência. Em Beja, a temperatura média exterior de inverno é de 10.9°C e no verão de 24.7°C, apresentando uma duração da estação de aquecimento de 5 meses enquanto em Vila Real é mais longa, com 6.9 meses (Portugal, 2013a).

A simulação da quantidade de energia renovável que é produzida pelos sistemas solares para cada cenário de renovação, resultou nos valores expostos nas tabelas 5.8 e 5.9, para a região de Vila Real e Beja, respetivamente.

Tabela 5.8 – Energia produzida a partir de fontes renováveis pelo edifício localizado em Vila Real

| Reabilitações | Energia solar térmica | | Energia solar fotovoltaica | |
|---------------|-----------------------|----------------|----------------------------|---------------|
| | E_{ren} | Fração servida | E_{ren} | $E_{ren,ext}$ |
| | (kWh/ano) | (%) | (kWh/ano) | (kWh/ano) |
| Base | 1465 | 62 | 0 | 0 |
| nZEB | 1949 | 91 | 0 | 0 |
| ZEB | 1949 | 91 | 290 | 1514 |

Tabela 5.9 - Energia produzida a partir de fontes renováveis pelo edifício localizado em Beja

| Reabilitações | Energia solar térmica | | Energia solar fotovoltaica | |
|---------------|-----------------------|----------------|----------------------------|---------------|
| | E_{ren} | Fração servida | E_{ren} | $E_{ren,ext}$ |
| | (kWh/ano) | (%) | (kWh/ano) | (kWh/ano) |
| Base | 1663 | 70 | 0 | 0 |
| nZEB | 2132 | 99 | 0 | 0 |
| ZEB | 2132 | 99 | 289 | 1330 |

Conclui-se que os dois tipos de sistemas solares analisados apresentam maior produção de energia em Beja, devido ao maior período de exposição solar. Nesta região, o coletor solar de

tubos de vácuo selecionado, cobre praticamente na totalidade as necessidades de AQS da habitação.

O desempenho energético do edifício é apresentado na Figura 5.10, quando localizado em Vila Real, e na Figura 5.11 para a localização em Beja.

Tabela 5.10 – Balanço energético de cada cenário do edifício localizado em Vila Real.

| Cenário | N _{ic} (kWh/ m ² .ano) | N _i (kWh/ m ² .ano) | N _{vc} (kWh/ m ² .ano) | N _v (kWh/ m ² .ano) | Q _a (kWh/ ano) | N _{tc} (kWh _{EP} / m ² .ano) | N _t (kWh _{EP} / m ² .ano) |
|------------------|--|---|--|---|---------------------------------|---|--|
| Sem reabilitação | 106.92 | 46.90 | 60.82 | 37.70 | 2377 | 344.70 | 175.37 |
| Base | 39.74 | | 35.43 | | | 2140 | 139.13 |
| nZEB | | 44.62 | 87.12 | | | | |
| ZEB | | 37.37 | 87.12 | | | | |

Tabela 5.11 - Balanço energético de cada cenário do edifício localizado em Beja.

| Cenário | N _{ic} (kWh/ m ² .ano) | N _i (kWh/ m ² .ano) | N _{vc} (kWh/ m ² .ano) | N _v (kWh/ m ² .ano) | Q _a (kWh/ ano) | N _{tc} (kWh _{EP} / m ² .ano) | N _t (kWh _{EP} / m ² .ano) |
|------------------|--|---|--|---|---------------------------------|---|--|
| Sem reabilitação | 101.81 | 45.52 | 47.47 | 30.57 | 2377 | 320.78 | 165.98 |
| Base | 39.78 | | 28.60 | | | 2140 | 131.30 |
| nZEB | | 40.23 | 80.17 | | | | |
| ZEB | | 33.01 | 80.17 | | | | |

Comparando com a zona do Porto, tanto em Vila Real como em Beja, as necessidades energéticas do edifício são menores na estação de aquecimento e maiores na estação de arrefecimento.

O consumo de energia total do edifício com renovação ZEB é maior quando se localiza em Vila Real e por essa razão, o sistema fotovoltaico projetado para o edifício no Porto não é suficiente. Optou-se então por colocar a mesma quantidade de módulos fotovoltaicos (oito módulos), mas com maior potência, ou seja, utilizaram-se módulos de 240 W em vez de 220 W.

Por outro lado, o edifício quando localizado em Beja, apresenta menores consumos totais de energia, não fazendo sentido, neste caso, utilizar os sistemas anteriores, pois estariam sobredimensionados. Foram selecionados apenas sete módulos fotovoltaicos de 220 W, que produzem energia necessária para climatização e AQS do edifício localizado em Beja.

5.4.2 Desempenho ambiental

A avaliação dos impactes ambientais, juntamente com os pesos atribuídos a cada impacte ambiental permite calcular o potencial de melhoria ambiental

O potencial de melhoria ambiental permite perceber qual dos cenários implica menores impactes ambientais ao longo da vida útil do edifício, tendo em conta os pesos atribuídos a cada categoria de impacte ambiental. O gráfico representado na Figura 5.8, mostra o potencial de melhoria ambiental de cada cenário de reabilitação do edifício em cada localização estudada.

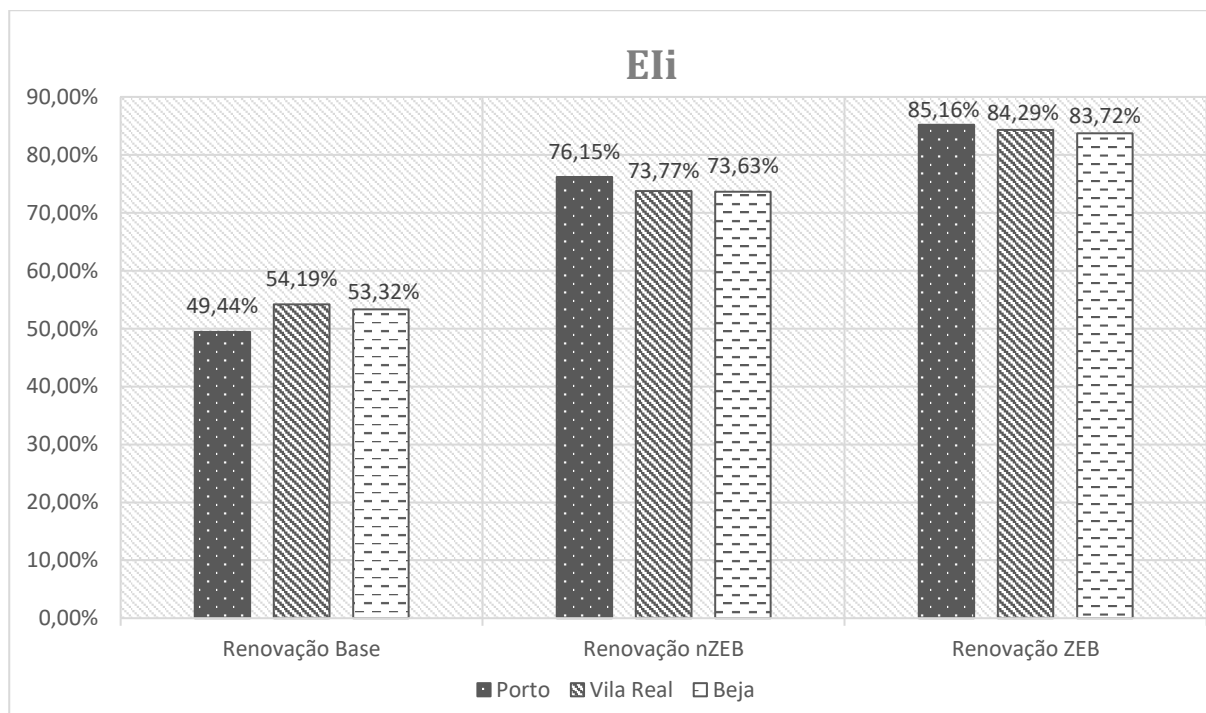


Figura 5.8 - Potencial de melhoria ambiental de cada cenário de reabilitação, para as diferentes zonas climáticas

Observando o gráfico é perceptível que diferença de percentagens entre cada cenário é mínima. Apesar disso, verifica-se que o edifício com renovação base tem maior potencial de melhoria

de desempenho ambiental em Vila Real, enquanto que, para as restantes renovações, o ELi é maior para o Porto.

A Tabela 5.12 mostra os tempos de retorno das emissões de carbono, assim como os tempos de retorno energético de cada cenário de renovação para cada localização considerada. Os gráficos correspondentes à acumulação das emissões de CO₂ e acumulação da energia incorporada de cada cenário, para as zonas de Vila Real e Beja, encontram-se representados no Anexo IV.

Tabela 5.12 - GPBT e EPBT de cada cenário por zona climática

| Cenário de renovação | Porto | Vila Real | Beja |
|-----------------------------|--------------|------------------|-------------|
| GPBT (meses) | | | |
| Base | 36 | 34 | 36 |
| nZEB | 22 | 24 | 26 |
| ZEB | 24 | 25 | 27 |
| EPBT (meses) | | | |
| Base | 29 | 28 | 30 |
| nZEB | 17 | 19 | 20 |
| ZEB | 18 | 21 | 22 |

Os tempos de retorno, tanto de carbono como energético, são praticamente iguais para cada região estudada, diferindo no máximo três meses entre elas. O cenário Base é o que apresenta maior período de retorno, seguido do ZEB e por último o nZEB. Salienta-se ainda que, observando os gráficos do Anexo IV percebe-se que, tal como se concluiu para o edifício do Porto, também em Vila Real e Beja, o cenário de renovação ZEB é o que apresenta menores emissões de carbono e menores gastos energéticos no final dos 30 anos de vida útil.

Foram também estudados os benefícios ambientais e energéticos da utilização de sistemas solares para as novas zonas climáticas, cujos resultados se encontram na Tabela 5.13.

O Anexo I, apresentam as emissões de CO₂ economizadas e a energia economizada correspondentes à utilização de cada sistema solar, para as zonas de Vila Real e Beja.

Tabela 5.13 – GPBT e EPBT dos sistemas solares para um período de 20 anos

| Cenário de renovação | Porto | Vila Real | Beja |
|-----------------------------|-------|-----------|------|
| GPBT (meses) | | | |
| SST do cenário Base | 23 | 27 | 24 |
| SST dos cenários nZEB e ZEB | 12 | 13 | 12 |
| PV do cenário ZEB | 38 | 36 | 40 |
| EPBT (meses) | | | |
| SST do cenário Base | 24 | 24 | 21 |
| SST dos cenários nZEB e ZEB | 12 | 12 | 11 |
| PV do cenário ZEB | 38 | 35 | 39 |

Note-se que, em todas as regiões em estudo, o sistema solar de tubos de vácuo tem sensivelmente metade do tempo de retorno do sistema solar padrão utilizado no cenário Base.

5.4.3 Desempenho económico

Os custos correspondentes aos cenários de reabilitação encontram-se nas tabelas seguintes, divididos por categorias. A Tabela 5.14 exhibe os resultados dos custos de ciclo de vida para o edifício em estudo localizado em Vila Real e a Tabela 5.15 mostra os resultados do mesmo edifício localizado em Beja.

Tabela 5.14 - Estimativa dos custos associados a cada cenário de estudo para a região climática de Vila Real (€)

| Custos | Cenário sem renovação | Renovação Base | Renovação nZEB | Renovação ZEB |
|----------------------|-----------------------|----------------|----------------|---------------|
| Investimento inicial | 7 366,00 | 26 142,00 | 30 706,00 | 34 856,00 |
| Substituição | 838,00 | 1 687,00 | 3 274,00 | 3 888,00 |
| Manutenção | 2 586,00 | 7 314,00 | 8 819,00 | 9 994,00 |
| Energia | 90 359,00 | 36 050,00 | 11 780,00 | 7 316,00 |
| Custo Global | 101 150,00 | 71 192,00 | 54 579,00 | 56 053,00 |

Tabela 5.15 - Estimativa dos custos associados a cada cenário de estudo para a região climática de Beja (€)

| Custos | Cenário sem renovação | Renovação Base | Renovação nZEB | Renovação ZEB |
|----------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| Investimento inicial | 8 204,00 | 26 142,00 | 30 706,00 | 34 856,00 |
| Substituição | 838,00 | 1 687,00 | 3 274,00 | 3 828,00 |
| Manutenção | 2 586,00 | 7 314,00 | 8 819,00 | 9 921,00 |
| Energia | 84 045,00 | 34 030,00 | 10 622,00 | 8 714,00 |
| Custo Global | 94 835,00 | 69 173,00 | 53 420,00 | 54 675,00 |

Os únicos custos que variam de região para região são os custos dos sistemas fotovoltaicos, que neste caso diferem para cada local selecionado, assim como a manutenção dos mesmos, e os custos energéticos para climatização e preparação das AQS que dependem das características climáticas de cada região.

O gráfico seguinte, representado na Figura 5.9, aglomera os custos globais de cada cenário de reabilitação para as diferentes zonas estudadas, tornando mais clara a comparação entre eles.

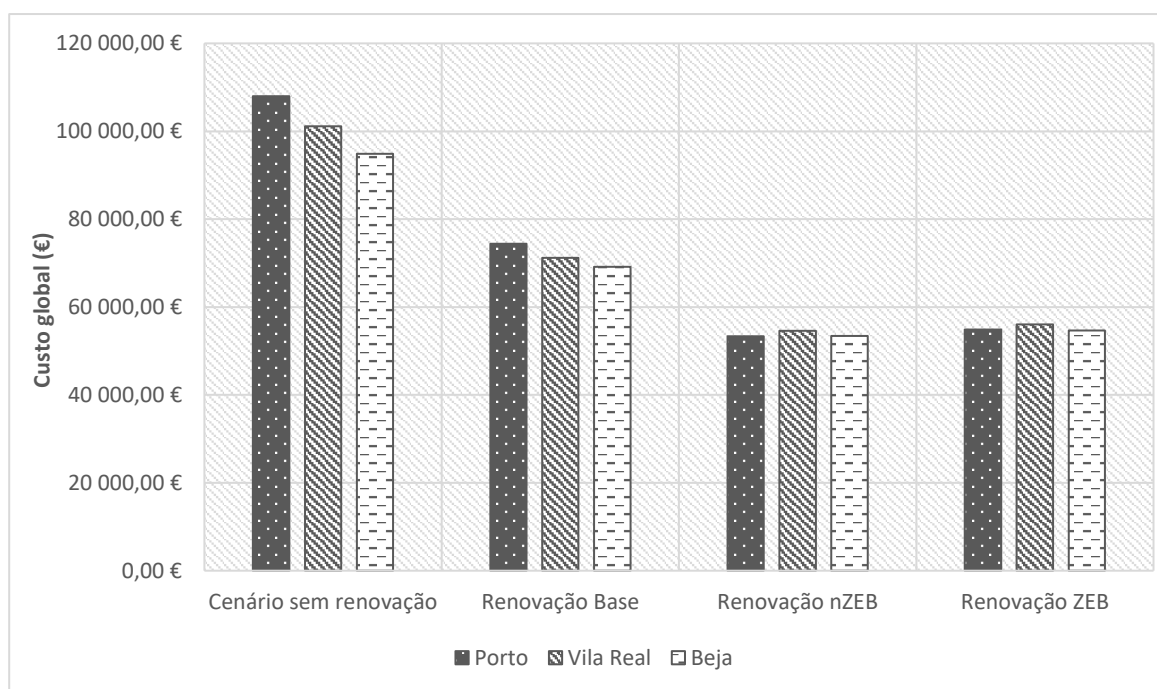


Figura 5.9 – Custos globais de cada cenário de reabilitação para diferentes zonas climáticas

O fator com mais influência nos custos globais são as necessidades de energia dos edifícios. Por esta razão, tal como era previsto pelos valores das necessidades energéticas, o cenário sem renovação e o cenário de renovação Base tem maiores custos globais quando localizados na zona climática do Porto. Os dois cenários de renovação restantes, apresentam maiores custos globais para a localização de Vila Real.

O Anexo V contém os custos de ciclo de vida acumulados dos cenários de reabilitação para as zonas em estudo. A avaliação destes gráficos mostra que o retorno económico resultante das renovações Base, nZEB e ZEB acontece aproximadamente aos 12 anos, 10 anos e 11 anos, respetivamente, para a zona climática de Vila Real e aos 13 anos, 11 anos e 12 anos para a zona climática de Beja.

Conclui-se a partir destes dados, que o retorno económico das renovações no Porto acontece um ano mais cedo do que em Vila Real e dois anos antes de Beja.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Este trabalho teve como caso de estudo um edifício habitacional unifamiliar representativo dos edifícios construídos entre 1961 e 1990. Foram estudados quatro cenários do mesmo edifício: um em que se considera apenas a manutenção do próprio edifício e três cenários de reabilitação com diferentes níveis de eficiência energética.

Para cada um deles, foi calculado o consumo de energia e foi realizada uma análise de ciclo de vida que inclui os impactos ambientais e os custos de vida útil do edifício. Além disso foi estimado o tempo de retorno energético e o tempo de retorno económico de cada reabilitação. Sendo o principal objetivo da reabilitação a diminuição das necessidades de energia do edifício, verifica-se uma redução de 61% do consumo energético no cenário Base e de 90% nos cenários nZEB e ZEB.

Esta redução das necessidades energéticas resultante das renovações, é evidente nos resultados da avaliação ambiental. Verifica-se através dos potenciais de melhoria ambiental, que o impacte ambiental incorporado nos materiais e sistemas adicionados nas reabilitações, é compensado pelos impactes que são poupados pela economia de energia ao longo da vida útil do edifício. O cenário ZEB apresenta-se como a renovação de menor impacte ambiental no final dos 30 anos de vida útil.

A emissão de gases de efeito de estufa, estando diretamente ligada ao consumo de energia não-renovável, foi estudada isoladamente de forma a avaliar o impacte que as medidas de reabilitação e a incorporação dos sistemas solares ostentam na redução da emissão destes gases. Os resultados apontam para uma redução na ordem dos 50%, 80% e 90% da quantidade de CO₂ a ser libertado para a atmosfera, respetivamente nos cenários de renovação Base, nZEB e ZEB. Estes valores mostram o potencial de redução das emissões de CO₂ que existe na maioria dos edifícios em Portugal.

Uma análise mais detalhada dos impactes ambientais permite concluir que os impactes referentes à energia contribuem em maior quantidade para os potenciais impactes globais de ciclo de vida do que os impactes incorporados nos materiais de construção e nos sistemas.

Em relação ao desempenho económico, verifica-se que o cenário sem renovação apresenta despesas bastante elevadas com a eletricidade e gás natural utilizados para climatização e AQS. Os cenários de reabilitação têm custos de investimento mais altos, assim como os custos de manutenção e substituição, no entanto, como consomem muito menos energia, o investimento é recuperado ao fim de um certo período. Considerando os custos de vida útil, todos os cenários de renovação são rentáveis, quando comparados ao cenário sem renovação, contudo, o que apresenta melhor desempenho económico corresponde à renovação nZEB.

Considerando todos os custos de ciclo de vida e tendo em conta as considerações relativas ao preço de venda da eletricidade, o retorno económico acontece aos 12 anos, 10 anos e 11 anos nas renovações Base, nZEB e ZEB, respetivamente. Neste caso, apesar do sistema solar fotovoltaico contribuir para que o edifício tenha um balanço energético nulo, o investimento não compensa economicamente quando a eletricidade é vendida à rede pública, devido à baixa remuneração.

Existem outras soluções, como a utilização de baterias para armazenar a energia solar produzida pelos painéis fotovoltaicos, permitindo utilizar essa energia nas horas de maior necessidade de consumo. Porém, as baterias contêm um elevado impacto ambiental incorporado e tendo em conta o seu período de vida útil de 10 anos, seria necessário fazer a sua substituição três vezes durante a vida útil do edifício. Outra razão que levou a não optar pelas baterias, encontra-se no custo destas e nas despesas de manutenção, que acabam por aumentar os custos totais de ciclo de vida.

No caso de a eletricidade gerada pelos painéis fotovoltaicos ser remunerada ao mesmo valor que é comprada aos CUR ou então ser deduzida a quantidade produzida da fatura elétrica, as repercussões são diferentes. Nesta situação, a implementação do sistema solar fotovoltaico seria economicamente rentável e a renovação ZEB seria a melhor em termos de desempenho económico de ciclo de vida.

A avaliação de ciclo de vida dos sistemas solares implementados em cada cenário de renovação, comprova as grandes vantagens que estes proporcionam. Todos os sistemas demonstram um curto período de retorno das emissões de carbono, assim como um tempo de retorno energético reduzido.

Estes sistemas de energias renováveis permitem a redução dos consumos energéticos e consequentemente a redução dos potenciais impactes ambientais de ciclo de vida de um edifício. No caso dos sistemas solares térmicos, conduzem também a uma redução dos custos de ciclo de vida. A aplicação dos sistemas solares fotovoltaicos nem sempre se traduz numa redução de custos, no entanto, em situações diferentes do caso em estudo, e tendo em conta a variação dos preços de compra e venda da eletricidade, pode verificar-se uma compensação económica.

Quando se comparam diferentes zonas climáticas, é perceptível que, em termos ambientais, o edifício implantado em Vila Real tem maior potencial de melhoria de desempenho ambiental no cenário de requisitos mínimos, enquanto nos cenários ZEB e nZEB o potencial é maior para o edifício com localização no Porto.

Em relação aos custos totais de ciclo de vida, estes acompanham o consumo de energia total de cada cenário em cada zona. Nos cenários sem reabilitação e reabilitação Base, o edifício do Porto apresenta maior consumo de energia final e é, portanto, o que apresenta maior custo total de ciclo de vida. Nos cenários nZEB e ZEB, o edifício implementado em Vila Real apresenta maiores consumos de energia, exibindo assim, os maiores custos totais para estes cenários.

Em conclusão, este estudo demonstra que é economizada uma grande quantidade de energia e são evitadas grandes quantidades de emissões de carbono em cada cenário de renovação durante a vida útil considerada. O cenário de balanço energético nulo é o que apresenta menor impacto ambiental, pois a conjugação dos SST com os SSFV permite que a energia utilizada no edifício para climatização e AQS seja totalmente de origem renovável, sem emissões poluentes. Por outro lado, a renovação mais rentável a nível económico corresponde ao cenário de balanço energético quase nulo, sendo possível constatar que o custo dos sistemas fotovoltaicos e as políticas relativas à venda de energia solar fotovoltaica em Portugal, não permitem que a aplicação desta tecnologia tenha um retorno económico quando utilizada em habitações unifamiliares.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Apesar desta dissertação incidir sobre a análise ambiental de ciclo de vida de diferentes cenários de um edifício, esta avaliação não inclui todas as etapas de ciclo de vida. A fase de transporte dos materiais para a obra e a fase de fim de vida não é considerada, devido ao peso menos significativo que apresentam nos impactes ambientais totais. Assim, um estudo futuro que englobe estas etapas de ciclo de vida poderia completar os resultados da análise realizada no âmbito desta dissertação.

Numa outra perspetiva em relação ao uso de energias renováveis, seria interessante fazer o estudo dos mesmos cenários com soluções de energia renovável integradas no próprio edifício, para dar resposta aos edifícios com área de implantação nula ou muito reduzida para colocação dos coletores solares convencionais. Além disso, para os edifícios que apresentam também muito sombreamento pode estudar-se a implementação de outros sistemas de energia renovável alternativos.

Outro aspeto pertinente a desenvolver no futuro é o alargamento deste estudo à escala europeia, prevendo o desempenho energético, ambiental e económico dos edifícios nas diferentes localidades da Europa de forma a comparar a influência deste tipo de reabilitações em diferentes países.

BIBLIOGRAFIA

- ADENE. (2011). Guia Da Eficiência Energética. *Guia Da Eficiência Energética*, 94.
- ADENE. (2016). Sistemas Solares Térmicos, 8. Retrieved from <http://www.adene.pt/sites/default/files/documentos/10see-06-sist-st.pdf>
- ADENE. (2017). ADENE - Agência para a energia. Retrieved February 8, 2017, from <http://www.adene.pt/eficiencia-energetica>
- APREN. (2016). *BOLETIM ENERGIAS RENOVÁVEIS - APREN: Associação Portuguesa de energias renováveis*. Portugal.
- BCSD Portugal. (2007). *Eficiência Energética em Edifícios*.
- Bragança, L., & Mateus, R. (2011). *Avaliação do Ciclo de vida dos edifícios - Impacte ambiental de soluções construtivas*.
- Camilo, M., Dousset, B., Caldwell, I., & Powell, F. (2017). Nature Climate Change. *Junho 2017*.
- Campos, M. (2012). *Abordagem de ciclo de vida na avaliação de impactos ambientais no processamento primário offshore*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Retrieved from <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10004757.pdf>
- Comissão Europeia. (2011). *Roteiro de transição para uma economia hipocarbónica*

- competitiva em 2050*. Bruxelas. Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0112&from=EN>
- Comodi, G., Bevilacqua, M., Caresana, F., Paciarotti, C., Pelagalli, L., & Venella, P. (2016). Life cycle assessment and energy-CO₂-economic payback analyses of renewable domestic hot water systems with unglazed and glazed solar thermal panels. *Applied Energy*, 164, 944–955. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.036>
- Conselho Europeu. (2014). *QUADRO DE AÇÃO RELATIVO AO CLIMA E À ENERGIA PARA 2030*. Bruxelas. Retrieved from <http://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-169-2014-INIT/pt/pdf>
- CYPE Ingenieros S.A. (2017). Gerador de preços - CYPE. Retrieved from <http://www.geradordeprecos.info/>
- Deliso, Y. (2014). Cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade para o desempenho energético de habitações residenciais unifamiliares objeto de reabilitação.
- DGEG. (2016). SCE.ER - Quantificação do contributo de sistemas para aproveitamento de Fontes de Energias Renováveis. Portugal.
- Ecoinvent. (2017). ecoinvent. Retrieved February 22, 2017, from <https://www.ecoinvent.org/>
- Erlandsson, M., & Borg, M. (2003). Generic LCA methodology applicable for buildings, constructions and operation services - today practice and development needs. *Building and Environment*, 38(7), 919–938.
- ERSE. (2017). Portal ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. Retrieved February 11, 2017, from <http://www.erse.pt/pt/Paginas/home.aspx>
- Fernandes, A., Guerra, M., Ribeiro, R., & Rodrigues, S. (2016). *Relatório do Estado do Ambiente 2016*. Portugal.
- Fernandes, D. (2012). *Estudo sobre a realidade da reabilitação de edifícios em Portugal: Abordagem térmico-energética*.
- Futursolutions. (2015). NZEB - Edifícios com Necessidades Energéticas Quase Nulas - Futursolutions. Retrieved February 9, 2017, from <http://futursolutions.pt/info/noticias/124-nzeb-edificios-com-necessidades-energeticas-quase-nulas>
- INE. (2016). PORDATA - Edifícios de habitação familiar clássicos em Portugal. Retrieved February 6, 2017, from <http://www.pordata.pt/Portugal/Edificios+de+habitacao+familiar+classica-92>
- INE, & LNEC. (2011). *O Parque Habitacional e a sua Reabilitação - Análise e Evolução 2001-2011*.

- ITeCons. (2016). Folha de Cálculo de Aplicação do REH (DL118/2013). Portugal: 2016.
Retrieved from <http://www.itecons.uc.pt/p3e/>
- Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2012). *Photovoltaic Degradation Rates - An Analytical Review: Preprint*. Retrieved from <http://www.osti.gov/bridge>:
- Lamnatou, C., Chemisana, D., Mateus, R., Almeida, M. G., & Silva, S. M. (2015). Review and perspectives on Life Cycle Analysis of solar technologies with emphasis on building-integrated solar thermal systems. *Renewable Energy*, 75, 833–846.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.057>
- LNEC. (2014). VENTILACAO_Rph_2014_02_12_v02a.
- LNEG. (2016). LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Retrieved December 10, 2016, from <http://www.lneg.pt/iedt/areas/3/>
- Mestre, A., Almeida, M., & Iten, M. (2016). A Portuguese study on building renovation towards a nearly zero energy building (nZEB).
- Portugal. ISO 14044:2006 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida (2006). Portugal.
- Portugal. Despacho n.º 15793-F/2013, de 3 de dezembro (2013).
- Portugal. Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação. Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de Agosto, Diário da República N.º 159, 1ª série § (2013). Retrieved from <http://www.reh.pt/>
- Portugal. Portaria n.º 14/2015 de 23 de janeiro, Pub. L. No. 14/2015, 8 (2015). Retrieved from <https://dre.pt/application/conteudo/66321164>
- Portugal. Decreto-Lei n.º 153/2014 - MINISTÉRIO DO AMBIENTE, ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E ENERGIA (2014). Retrieved from <https://dre.pt/application/file/58428682>
- Santos, C., & Matias, L. (2006). *ITE50 - LNEC*. (LNEC, Ed.). Lisboa: 2006.
- Silva, S., Mateus, R., Marques, L., Ramos, M., & Almeida, M. (2016). Contribution of the solar systems to the ZEB design concept.
- SimaPro. (2015). SimaPro 8. Retrieved from simapro.co.uk
- Technical Committee ISO/TC 207. ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Pub. L. No. 14040, 2006 20 (2006).
- TISST. (2015). COLETORES DE TUBOS DE VÁCUO: Energia Solar Térmica. Retrieved February 10, 2017, from <http://www.tisst.net/products/coletores-de-tubos-de-vacu/>
- Trilhos Energéticos. (2015). Sistema termossifão - Soluções sustentáveis. Retrieved February 6, 2017, from <http://trilhosenergeticos.pt/wp-content/uploads/2014/04/termossifão2.png?866e1f>

Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33(3), 289–296. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6)

União Europeia. Directiva 2010/31/UE, Jornal Oficial da União Europeia § (2010). https://doi.org/10.3000/17252601.L_2010.153.por

União Europeia. (2010b). EPBD recast, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, 23.

União Europeia. Diretiva 2012/27/UE, Jornal Oficial da União Europeia § (2012).

União Europeia. Orientações que acompanham o Regulamento Delegado (UE) n° 244/2012 da Comissão, de 16 de Janeiro de 2012. (2012). Retrieved from [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012XC0419\(02\)&from=PT](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012XC0419(02)&from=PT)

ANEXO I – EMISSÕES DE CO₂ E CED_{TOT} ASSOCIADOS AOS SISTEMAS SOLARES

- EDIFÍCIO INSERIDO NA ZONA CLIMÁTICA DO PORTO

| Sistemas solares | CO ₂ | CO ₂ | Emissões de CO ₂ |
|-----------------------------|---|--|--|
| | incorporado [Kg.CO ₂ .eq] | manutenção [Kg.CO ₂ .eq] | economizadas [Kg.CO ₂ .eq] |
| SST do cenário Base | 9,75E+02 | 3,16E+00 | -4,38E+02 |
| SST dos cenários nZEB e ZEB | 2,72E+02 | 1,15E+00 | -2,71E+02 |
| PV do cenário ZEB | 3,17E+03 | 1,15E+00 | -9,93E+02 |

| Sistemas solares | CED _{TOT} | CED _{TOT} | CED _{TOT} |
|-----------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | incorporado [MJ] | manutenção [MJ] | economizada [MJ] |
| SST do cenário Base | 1,37E+04 | 9,03E+01 | -7,15E+03 |
| SST dos cenários nZEB e ZEB | 4,38E+03 | 3,24E+01 | -4,63E+03 |
| PV do cenário ZEB | 5,24E+04 | 3,24E+01 | -1,69E+04 |

- EDIFÍCIO INSERIDO NA ZONA CLIMÁTICA DE VILA REAL

| Sistemas solares | CO ₂ | CO ₂ | Emissões de CO ₂ |
|-----------------------------|---|--|--|
| | incorporado [Kg.CO ₂ .eq] | manutenção [Kg.CO ₂ .eq] | economizadas [Kg.CO ₂ .eq] |
| SST do cenário Base | 1,37E+04 | 9,03E+01 | -4,43E+02 |
| SST dos cenários nZEB e ZEB | 4,38E+03 | 3,24E+01 | -2,69E+02 |
| PV do cenário ZEB | 5,24E+04 | 3,24E+01 | -1,07E+03 |

| Sistemas solares | CED_{TOT} incorporado [MJ] | CED_{TOT} manutenção [MJ] | CED_{TOT} economizada [MJ] |
|-----------------------------|---|--|---|
| SST do cenário Base | 1,37E+04 | 9,03E+01 | -7,23E+03 |
| SST dos cenários nZEB e ZEB | 4,38E+03 | 3,24E+01 | -4,59E+03 |
| PV do cenário ZEB | 5,24E+04 | 3,24E+01 | -1,83E+04 |

- EDIFÍCIO INSERIDO NA ZONA CLIMÁTICA DE BEJA

| Sistemas solares | CO₂ incorporado [Kg.CO₂.eq] | CO₂ manutenção [Kg.CO₂.eq] | Emissões de CO₂ economizadas [Kg.CO₂.eq] |
|-----------------------------|--|---|---|
| SST do cenário Base | 1,37E+04 | 9,03E+01 | -5,03E+02 |
| SST dos cenários nZEB e ZEB | 4,38E+03 | 3,24E+01 | -2,95E+02 |
| PV do cenário ZEB | 5,24E+04 | 3,24E+01 | -9,62E+02 |

| Sistemas solares | CED_{TOT} incorporado [MJ] | CED_{TOT} manutenção [MJ] | CED_{TOT} economizada [MJ] |
|-----------------------------|---|--|---|
| SST do cenário Base | 9,75E+02 | 3,16E+00 | -8,11E+03 |
| SST dos cenários nZEB e ZEB | 2,72E+02 | 1,15E+00 | -4,99E+03 |
| PV do cenário ZEB | 3,17E+03 | 1,15E+00 | -1,64E+04 |

ANEXO II – CUSTOS DETALHADOS DE INVESTIMENTO E MANUTENÇÃO DE CADA CENÁRIO ESTUDADO.

| Custos | | Cenário sem renovação | Renovação Base | Renovação nZEB | Renovação ZEB |
|---|----------------------------|-----------------------|----------------|----------------|---------------|
| Custos de investimento inicial (€) | | | | | |
| Envolvente | Fachada | 4051 | 7575 | | |
| | Cobertura | 904 | 6338 | | |
| | Pavimento | - | 1347 | | |
| | Vãos envidraçados e opacos | - | 5641 | | |
| Sistemas técnicos | Aquecimento | 224 | | 5112 | |
| | Arrefecimento | 1792 | | | |
| | AQS | 395 | | 2232 | |
| Sistemas solares | Solar térmico | - | 2442 | 2072 | |
| | Solar fotovoltaico | - | - | - | 3996 |
| Custos de manutenção (€) | | | | | |
| Envolvente | Fachada | 2734 | 2749 | | |
| | Cobertura | 70 | 62 | | |
| | Pavimento | - | - | | |
| | Vãos envidraçados e opacos | - | 294 | | |
| Sistemas técnicos | Aquecimento | 114 | | 3697 | |
| | Arrefecimento | 1505 | | | |
| | AQS | 1124 | | 1350 | |
| Sistemas solares | Solar térmico | - | 5566 | 5566 | |
| | Solar fotovoltaico | - | - | - | 1798 |

ANEXO III – CUSTOS ANUAIS DE CADA CENÁRIO ESTUDADO.

- CENÁRIO SEM REABILITAÇÃO

| Ano | Investimento e Substituição | Custos de Manutenção | Custos de Energia | Sum | Fator de desconto | VAL |
|-----|-----------------------------|----------------------|-------------------|---------|-------------------|-----------|
| 0 | 7 366 € | - | - | 7 366 € | - | 7 366 € |
| 1 | 0 € | 44 € | 3 338 € | 3 382 € | 0,97 | 3 283 € |
| 2 | 0 € | 44 € | 3 438 € | 3 482 € | 0,94 | 3 282 € |
| 3 | 0 € | 44 € | 3 541 € | 3 585 € | 0,92 | 3 281 € |
| 4 | 0 € | 44 € | 3 647 € | 3 691 € | 0,89 | 3 280 € |
| 5 | 0 € | 44 € | 3 757 € | 3 801 € | 0,86 | 3 279 € |
| 6 | 0 € | 44 € | 3 869 € | 3 913 € | 0,84 | 3 277 € |
| 7 | 0 € | 44 € | 3 985 € | 4 030 € | 0,81 | 3 276 € |
| 8 | 0 € | 948 € | 4 105 € | 5 053 € | 0,79 | 3 989 € |
| 9 | 0 € | 44 € | 4 228 € | 4 272 € | 0,77 | 3 274 € |
| 10 | 0 € | 44 € | 4 355 € | 4 399 € | 0,74 | 3 273 € |
| 11 | 0 € | 44 € | 4 486 € | 4 530 € | 0,72 | 3 272 € |
| 12 | 0 € | 44 € | 4 620 € | 4 664 € | 0,70 | 3 271 € |
| 13 | 0 € | 44 € | 4 759 € | 4 803 € | 0,68 | 3 271 € |
| 14 | 0 € | 44 € | 4 902 € | 4 946 € | 0,66 | 3 270 € |
| 15 | 0 € | 44 € | 5 049 € | 5 093 € | 0,64 | 3 269 € |
| 16 | 0 € | 948 € | 5 200 € | 6 148 € | 0,62 | 3 831 € |
| 17 | 0 € | 44 € | 5 356 € | 5 400 € | 0,61 | 3 267 € |
| 18 | 0 € | 44 € | 5 517 € | 5 561 € | 0,59 | 3 266 € |
| 19 | 0 € | 44 € | 5 682 € | 5 726 € | 0,57 | 3 266 € |
| 20 | 2 411 € | 44 € | 5 853 € | 8 308 € | 0,55 | 4 600 € |
| 21 | 0 € | 44 € | 6 028 € | 6 072 € | 0,54 | 3 264 € |
| 22 | 0 € | 44 € | 6 209 € | 6 253 € | 0,52 | 3 264 € |
| 23 | 0 € | 44 € | 6 396 € | 6 440 € | 0,51 | 3 263 € |
| 24 | 0 € | 948 € | 6 587 € | 7 535 € | 0,49 | 3 707 € |
| 25 | 0 € | 44 € | 6 785 € | 6 829 € | 0,48 | 3 262 € |
| 26 | 0 € | 44 € | 6 989 € | 7 033 € | 0,46 | 3 261 € |
| 27 | 0 € | 44 € | 7 198 € | 7 242 € | 0,45 | 3 260 € |
| 28 | 0 € | 44 € | 7 414 € | 7 458 € | 0,44 | 3 260 € |
| 29 | 0 € | 44 € | 7 637 € | 7 681 € | 0,42 | 3 259 € |
| 30 | -1 206 € | 44 € | 7 866 € | 6 704 € | 0,41 | 2 762 € |
| | | | | | | 108 007 € |

- CENÁRIO DE REABILITAÇÃO BASE

| Ano | Custos de Investimento inicial e Substituição | | | Custos de Manutenção | Custos de Energia | Sum | Fator de desconto | VAL |
|-----|---|-------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| | Materiais | Sistemas técnicos | Sistema solar térmico | | | | | |
| 0 | 21 290 € | 2 410 € | 2 442 € | - | - | 26 142 € | - | 26 142 € |
| 1 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 348 € | 1 633 € | 0,97 | 1 586 € |
| 2 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 389 € | 1 674 € | 0,94 | 1 578 € |
| 3 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 430 € | 1 716 € | 0,92 | 1 570 € |
| 4 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 473 € | 1 758 € | 0,89 | 1 562 € |
| 5 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 517 € | 1 803 € | 0,86 | 1 555 € |
| 6 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 563 € | 1 848 € | 0,84 | 1 548 € |
| 7 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 610 € | 1 895 € | 0,81 | 1 541 € |
| 8 | 0 € | 0 € | 0 € | 1 189 € | 1 658 € | 2 847 € | 0,79 | 2 248 € |
| 9 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 708 € | 1 993 € | 0,77 | 1 528 € |
| 10 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 759 € | 2 044 € | 0,74 | 1 521 € |
| 11 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 812 € | 2 097 € | 0,72 | 1 515 € |
| 12 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 866 € | 2 152 € | 0,70 | 1 509 € |
| 13 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 922 € | 2 207 € | 0,68 | 1 503 € |
| 14 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 1 980 € | 2 265 € | 0,66 | 1 498 € |
| 15 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 2 039 € | 2 325 € | 0,64 | 1 492 € |
| 16 | 0 € | 0 € | 0 € | 1 189 € | 2 100 € | 3 290 € | 0,62 | 2 050 € |
| 17 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 2 163 € | 2 449 € | 0,61 | 1 482 € |
| 18 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 2 228 € | 2 514 € | 0,59 | 1 477 € |
| 19 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 2 295 € | 2 580 € | 0,57 | 1 472 € |
| 20 | 0 € | 2 410 € | 2 442 € | 285 € | 2 364 € | 7 501 € | 0,55 | 4 153 € |
| 21 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 2 435 € | 2 720 € | 0,54 | 1 462 € |
| 22 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 2 508 € | 2 793 € | 0,52 | 1 458 € |
| 23 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 2 583 € | 2 869 € | 0,51 | 1 453 € |
| 24 | 0 € | 0 € | 0 € | 1 189 € | 2 661 € | 3 850 € | 0,49 | 1 894 € |
| 25 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 2 741 € | 3 026 € | 0,48 | 1 445 € |
| 26 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 2 823 € | 3 108 € | 0,46 | 1 441 € |
| 27 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 2 907 € | 3 193 € | 0,45 | 1 437 € |
| 28 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 2 995 € | 3 280 € | 0,44 | 1 434 € |
| 29 | 0 € | 0 € | 0 € | 285 € | 3 085 € | 3 370 € | 0,42 | 1 430 € |
| 30 | 0 € | -1 205 € | -1 221 € | 285 € | 3 177 € | 1 036 € | 0,41 | 427 € |
| | | | | | | | | 74 410 € |

• CENÁRIO DE REABILITAÇÃO NZEB

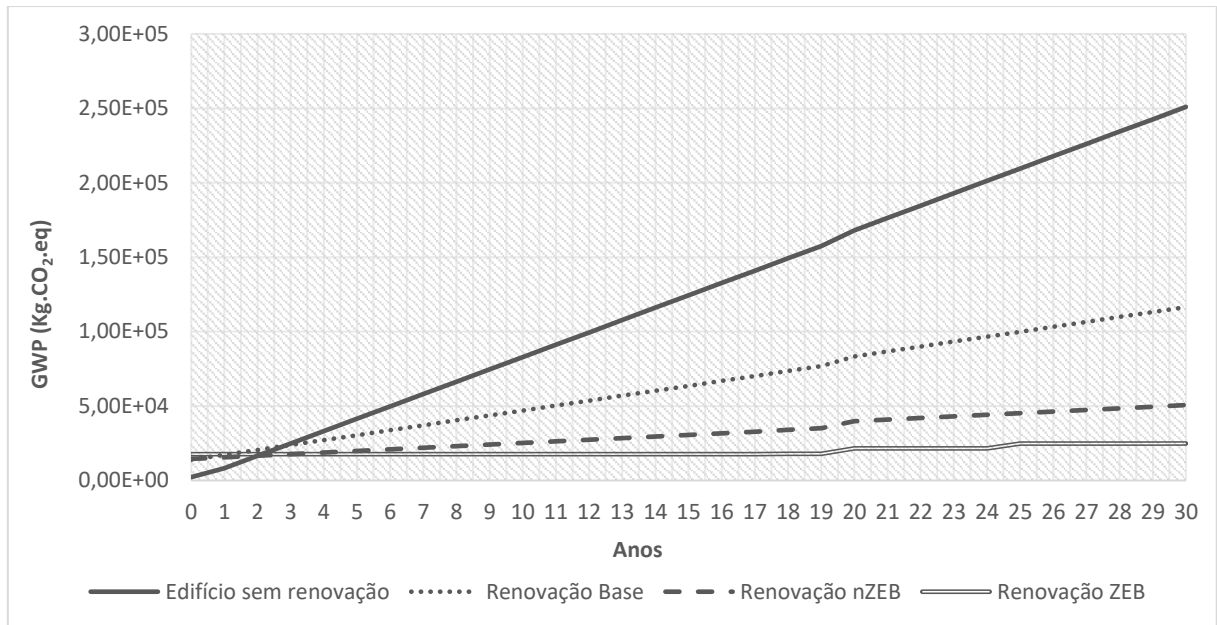
| Ano | Custos de Investimento inicial e Substituição | | | Custos de Manutenção | Custos de Energia | Sum | Fator de desconto | VAL |
|-----|---|-------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| | Materiais | Sistemas técnicos | Sistema solar térmico | | | | | |
| 0 | 21 290 € | 7 344 € | 2 072 € | | | 30 706 € | | 30 706 € |
| 1 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 363 € | 726 € | 0,97 | 704 € |
| 2 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 374 € | 736 € | 0,94 | 694 € |
| 3 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 386 € | 748 € | 0,92 | 684 € |
| 4 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 397 € | 759 € | 0,89 | 675 € |
| 5 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 409 € | 771 € | 0,86 | 665 € |
| 6 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 421 € | 783 € | 0,84 | 656 € |
| 7 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 434 € | 796 € | 0,81 | 647 € |
| 8 | 0 € | 0 € | 0 € | 1 266 € | 447 € | 1 713 € | 0,79 | 1 352 € |
| 9 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 460 € | 822 € | 0,77 | 630 € |
| 10 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 474 € | 836 € | 0,74 | 622 € |
| 11 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 488 € | 851 € | 0,72 | 614 € |
| 12 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 503 € | 865 € | 0,70 | 607 € |
| 13 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 518 € | 880 € | 0,68 | 599 € |
| 14 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 534 € | 896 € | 0,66 | 592 € |
| 15 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 550 € | 912 € | 0,64 | 585 € |
| 16 | 0 € | 0 € | 0 € | 1 266 € | 566 € | 1 832 € | 0,62 | 1 142 € |
| 17 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 583 € | 945 € | 0,61 | 572 € |
| 18 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 601 € | 963 € | 0,59 | 566 € |
| 19 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 619 € | 981 € | 0,57 | 559 € |
| 20 | 0 € | 7 344 € | 2 072 € | 362 € | 637 € | 10 415 € | 0,55 | 5 767 € |
| 21 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 656 € | 1 019 € | 0,54 | 547 € |
| 22 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 676 € | 1 038 € | 0,52 | 542 € |
| 23 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 696 € | 1 058 € | 0,51 | 536 € |
| 24 | 0 € | 0 € | 0 € | 1 266 € | 717 € | 1 983 € | 0,49 | 976 € |
| 25 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 739 € | 1 101 € | 0,48 | 526 € |
| 26 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 761 € | 1 123 € | 0,46 | 521 € |
| 27 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 784 € | 1 146 € | 0,45 | 516 € |
| 28 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 807 € | 1 169 € | 0,44 | 511 € |
| 29 | 0 € | 0 € | 0 € | 362 € | 832 € | 1 194 € | 0,42 | 507 € |
| 30 | 0 € | -3 672 € | -1 036 € | 362 € | 856 € | -3 489 € | 0,41 | -1 438 € |
| | | | | | | | | 53 384 € |

• CENÁRIO DE REABILITAÇÃO ZEB

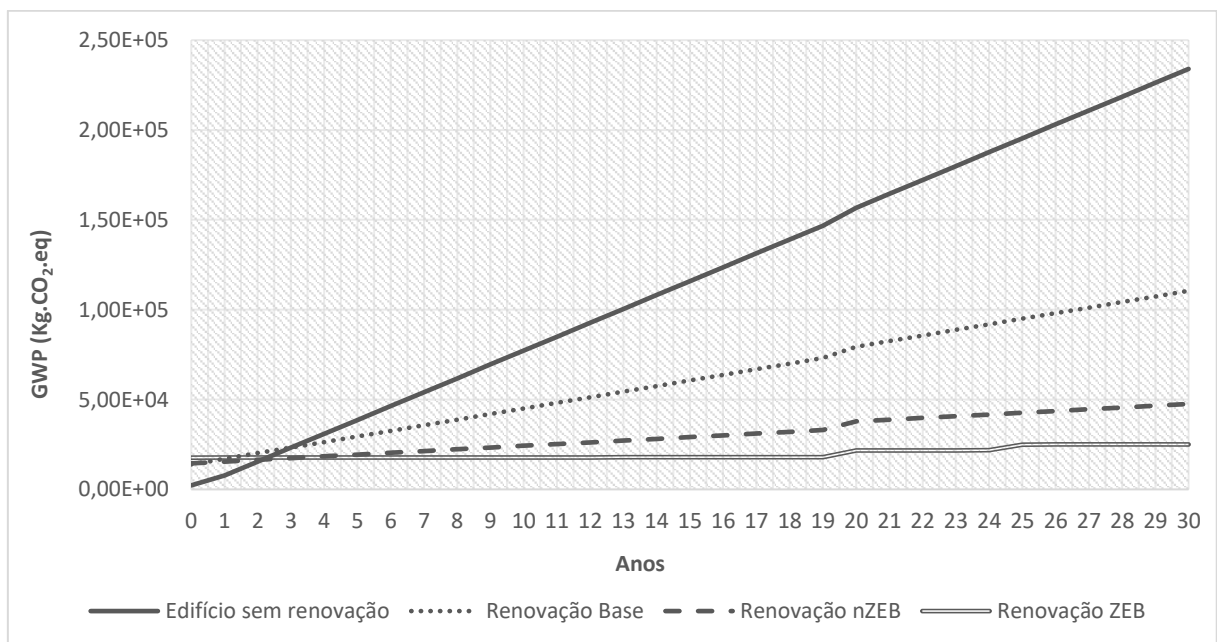
| Custos de Investimento inicial e Substituição | | | | | Custos de Manutenção | Energia comprada | Energia vendida | Sum | Fator de desconto | VAL |
|---|-----------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|----------|----------------------|----------|
| Ano | Materiais | Sistemas técnicos | Sistema solar térmico | Sistemas solar fotovoltaico | | | | | | |
| 0 | 21 290 € | 7 344 € | 2 072 € | 3 996 € | | | | 34 702 € | | 34 702 € |
| 1 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 298 € | -85 € | 635 € | 0,97 | 617 € |
| 2 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 307 € | -87 € | 642 € | 0,94 | 605 € |
| 3 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 316 € | -89 € | 649 € | 0,92 | 594 € |
| 4 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 326 € | -91 € | 657 € | 0,89 | 583 € |
| 5 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 335 € | -93 € | 664 € | 0,86 | 573 € |
| 6 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 345 € | -95 € | 672 € | 0,84 | 563 € |
| 7 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 356 € | -97 € | 680 € | 0,81 | 553 € |
| 8 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1 326 € | 366 € | -100 € | 1 593 € | 0,79 | 1 257 € |
| 9 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 377 € | -102 € | 697 € | 0,77 | 534 € |
| 10 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 389 € | -105 € | 706 € | 0,74 | 526 € |
| 11 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 400 € | -107 € | 715 € | 0,72 | 517 € |
| 12 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 412 € | -109 € | 725 € | 0,70 | 509 € |
| 13 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 425 € | -112 € | 735 € | 0,68 | 500 € |
| 14 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 438 € | -115 € | 745 € | 0,66 | 492 € |
| 15 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 451 € | -117 € | 755 € | 0,64 | 485 € |
| 16 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1 326 € | 464 € | -120 € | 1 670 € | 0,62 | 1 041 € |
| 17 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 478 € | -123 € | 777 € | 0,61 | 470 € |
| 18 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 492 € | -126 € | 789 € | 0,59 | 463 € |
| 19 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 507 € | -129 € | 801 € | 0,57 | 457 € |
| 20 | 0 € | 7 344 € | 2 072 € | 0 € | 422 € | 522 € | -132 € | 10 229 € | 0,55 | 5 663 € |
| 21 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 538 € | -135 € | 825 € | 0,54 | 444 € |
| 22 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 554 € | -138 € | 838 € | 0,52 | 438 € |
| 23 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 571 € | -141 € | 852 € | 0,51 | 432 € |
| 24 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1 326 € | 588 € | -144 € | 1 770 € | 0,49 | 871 € |
| 25 | 0 € | 0 € | 0 € | 3 996 € | 422 € | 606 € | -174 € | 4 850 € | 0,48 | 2 316 € |
| 26 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 624 € | -178 € | 868 € | 0,46 | 403 € |
| 27 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 643 € | -182 € | 883 € | 0,45 | 397 € |
| 28 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 662 € | -186 € | 898 € | 0,44 | 392 € |
| 29 | 0 € | 0 € | 0 € | 0 € | 422 € | 682 € | -190 € | 913 € | 0,42 | 388 € |
| 30 | 0 € | -3 672 € | -1 036 € | -3 197 € | 422 € | 702 € | -195 € | -6 976 € | 0,41 | -2 874 € |
| | | | | | | | | | | 54 911 € |

ANEXO IV – RESULTADOS DO DESEMPENHO AMBIENTAL PARA AS ZONAS CLIMÁTICAS DE VILA REAL E BEJA.

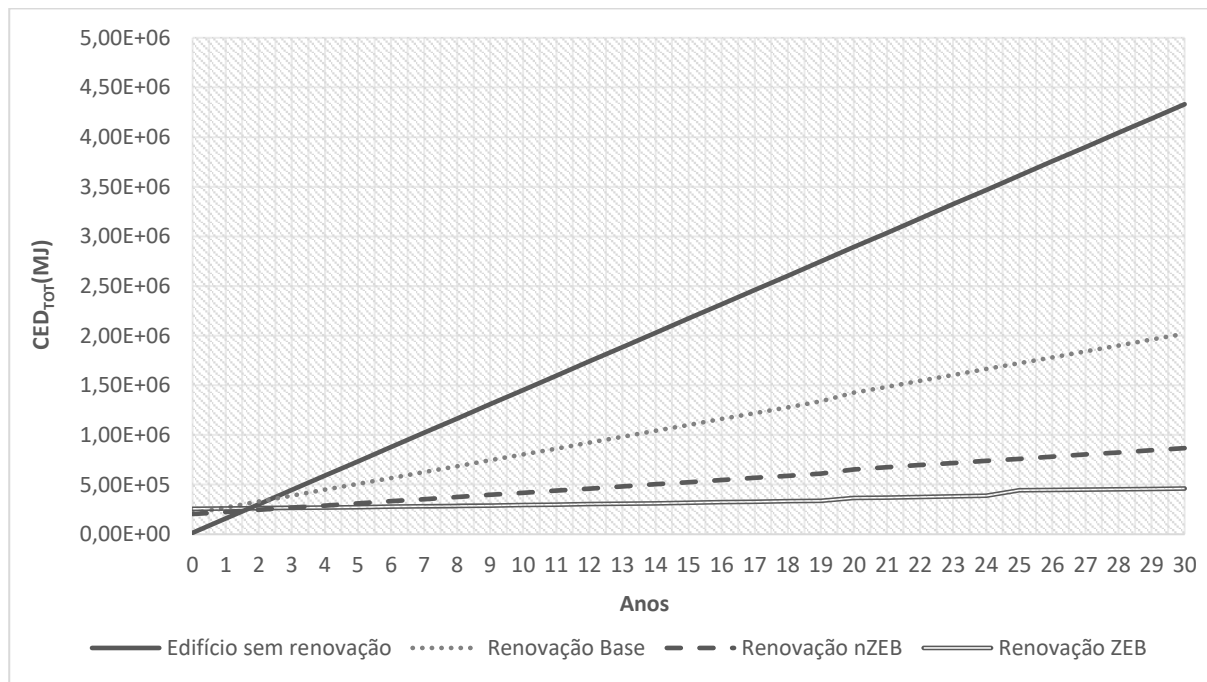
- GWP ACUMULADO DO EDIFÍCIO LOCALIZADO EM VILA REAL



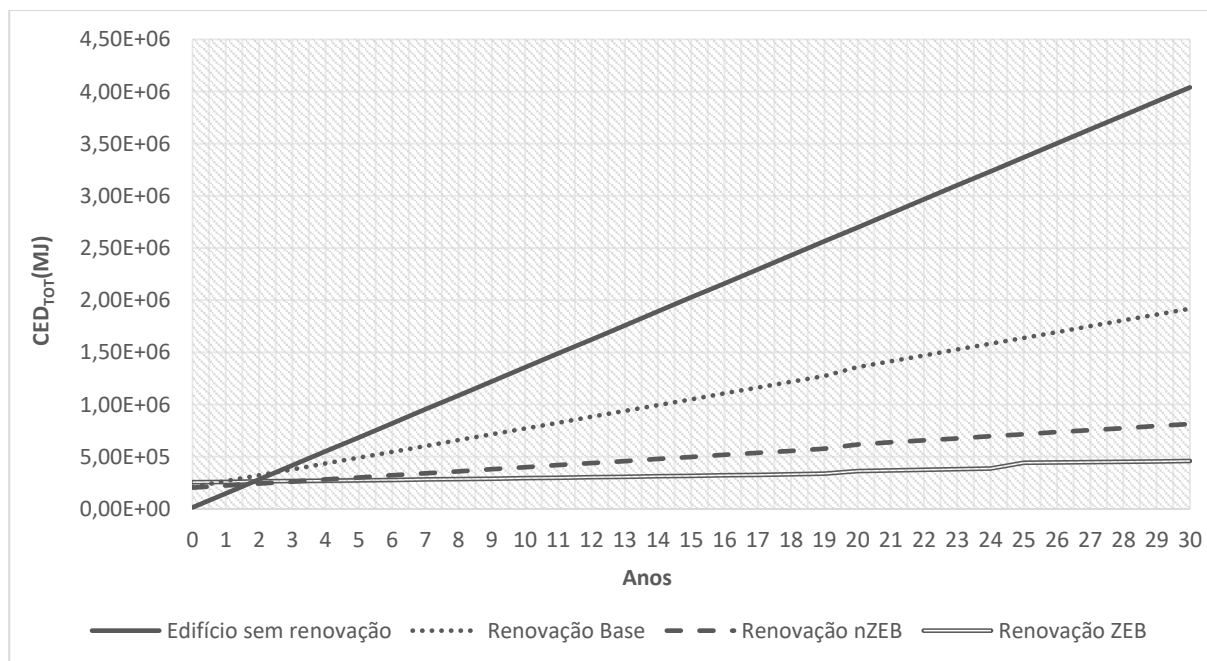
- GWP ACUMULADO DO EDIFÍCIO LOCALIZADO EM BEJA



• **ENERGIA INCORPORADA ACUMULADA DO EDIFÍCIO LOCALIZADO EM VILA REAL**

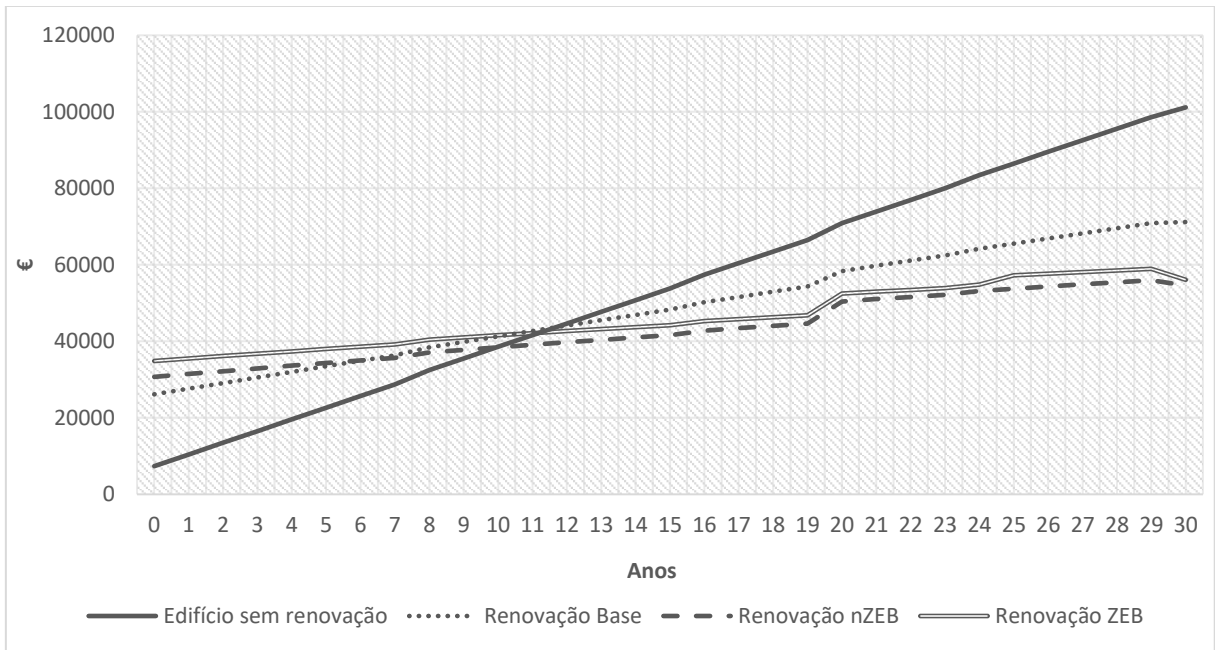


• **ENERGIA INCORPORADA ACUMULADA DO EDIFÍCIO LOCALIZADO EM BEJA**



ANEXO V – CUSTOS DE CICLO DE VIDA ACUMULADOS DE CADA CENÁRIO ESTUDADO.

VILA REAL



BEJA

