



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

André Manuel Costa Frade

**AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, área de especialização em Energia orientada pelo Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes e pela Professora Doutora Dulce Helena de Carvalho Coelho apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Setembro de 2019



Faculdade de Ciências do Desporto e Educação Física  
da Universidade de Coimbra

# AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

André Manuel Costa Frade

Tese no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, área de especialização em Energia orientada pelo Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes e pela Professora Doutora Dulce Helena de Carvalho Coelho e apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Setembro de 2019



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA



# Agradecimentos

Agradeço ao Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes, orientador da dissertação, pela disponibilidade e apoio ao longo dos últimos meses, de forma a garantir que tinha o apoio necessário para a realização deste trabalho.

Exprimo a minha gratidão à Professora Doutora Dulce Helena de Carvalho Coelho, pela orientação e disponibilidade demonstrada, especialmente na fase final do trabalho.

Deixo um agradecimento aos meus Pais, Avós e ao meu irmão, agradeço pelo apoio e confiança, ao longo do meu percurso escolar, sem eles nunca teria sido possível.

Agradeço também a todos os meus amigos e colegas que deixaram um pouco de si e levaram um pouco de mim, especialmente durante os últimos anos, obrigado pela amizade e memórias.

A todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (DEEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC) que de diversas formas contribuíram para que fosse possível chegar até aqui.

A todos um sincero agradecimento.



Este trabalho teve apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) via COMPETE – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), no âmbito dos projetos T4ENERTEC (POCI-01-0145-FEDER-029820) e UID/MULTI/00308/2013.

This work has been supported by the European Regional Development Fund through the COMPETE 2020 Program and FCT, under projects UID/MULTI/00308/2013, and "T4ENERTEC" POCI-01-0145-FEDER-029820





# Resumo

O setor residencial em Portugal é responsável por uma elevada percentagem dos consumos de energia final. A este consumo está associado um nível alto de ineficiência energética, principalmente devido à idade e aos aspetos construtivos do parque habitacional. A promoção da eficiência energética, através da reabilitação de edifícios, deve ser encarada como uma ferramenta importante no combate às alterações climáticas, contribuindo para um futuro ecologicamente sustentável.

Esta dissertação desenvolve um modelo assente numa metodologia de apoio à decisão baseada em análise multicritério, para a classificação de medidas de eficiência energética em edifícios residenciais, num contexto de reabilitação. Este tipo de análise permite a comparação de dados quantitativos e qualitativos, o que a torna particularmente adequado neste tipo de problemas. Os resultados da análise devem ser relevantes para as várias entidades envolvidas, desde os consumidores até aos decisores políticos. Para servir este propósito os critérios utilizados na metodologia têm de servir as várias partes interessadas.

Para efetuar a classificação das medidas foi escolhido o método ELECTRE TRI. A seleção dos critérios de avaliação começou pela utilização de critérios comuns a análises tradicionais, tipicamente focadas no contexto económico, como por exemplo, o investimento inicial e a redução de consumos. Foi adicionado um critério ambiental que permite avaliar a quantidade de emissões de gases com efeito de estufa durante todo o ciclo de vida das medidas. Por fim, foram utilizados dois critérios direcionados para o decisor político, a capacidade de penetração no mercado na ausência de incentivos e a adequação para serem suportadas por políticas de promoção de eficiência energética.

**Palavras chave:** Eficiência Energética, Análise Multicritério, Reabilitação Energética de Edifícios, Análise de Ciclo de Vida, Edifícios Residenciais



# Abstract

The residential sector in Portugal is responsible for a high percentage of final energy consumption. This consumption is associated with a high level of energy inefficiency, mainly due to the age and the constructive aspects of the housing stock. Promoting energy efficiency through rehabilitation should be seen as an important tool to fight climate change, contributing to an ecologically sustainable future.

This dissertation develops a model based on a decision support methodology based on multicriteria analysis. The purpose of this methodology is the classification of energy efficiency measures in residential buildings, in a rehabilitation context. This type of analysis allows the comparison of quantitative and qualitative data, which makes it particularly suitable for such problems. The results of the analysis must be relevant to the various entities involved, from consumers to policy makers. To serve this purpose the criteria used in the methodology have to serve the various stakeholders.

ELECTRE TRI was the chosen method to classify the energy efficiency measures. The selection of the evaluation criteria began by using criteria common to classical analyzes, typically focused on the economic context, such as initial investment and consumption reduction. Next, an environmental criterion was selected to assess the amount of greenhouse gas emissions during the life cycle of the measures. Finally, two criteria for the policy maker were selected: the ability to penetrate the market in the absence of incentives and the adequacy to be supported by energy efficiency promotion policies.

**Keywords:** Energy Efficiency, Multi-Criteria Analysis, Energy Rehabilitation of Buildings, Life Cycle Analysis, Residential Building



# Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Lista de acrónimos.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Estrutura da dissertação.....	5
2. Revisão de literatura.....	7
2.1. Metodologias de avaliação de eficiência na construção.....	7
2.1.1. Método LiderA.....	8
2.1.2. Metodologia SBTool <sup>PT</sup> Urban.....	9
2.1.3. Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM)	11
2.1.4. Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency (CASBEE).....	13
2.1.5. Leadership in Energy & Environmental Design (LEED).....	14
2.2. Metodologias de avaliação de medidas de eficiência energética em edifícios residenciais.	14
2.2.1. Métodos de simulação computacional.....	16
2.2.2. Métodos de avaliação do ciclo de vida.....	17
3. Caracterização do sector residencial em Portugal.....	19
3.1. Caracterização do edificado.....	19
3.2. Caracterização dos consumos.....	23
4. Metodologia de avaliação.....	25
4.1. Metodologias multicritério de apoio à decisão (MCDA).....	25
4.2. Seleção de medidas de eficiência energética.....	26
4.3. Critérios de avaliação.....	28
4.4. Processo de avaliação.....	30
4.4.1. Método ELECTRE TRI.....	30
4.4.2. Aplicação computacional IRIS.....	31
4.5. Avaliação do desempenho das medidas.....	32
4.5.1. Avaliação do ciclo de vida das medidas seleccionadas.....	33

5.	Aplicação da metodologia.....	39
5.1.	Desempenhos das medidas selecionadas.....	39
5.2.	Perfis e limiares usados no <i>software</i> IRIS.....	40
5.3.	Análise de alguns resultados.....	40
6.	Conclusões e trabalho futuro.....	47
6.1.	Conclusão.....	47
6.2.	Linhas de trabalho futuro.....	48
	Referências bibliográficas.....	51
	Apêndice A.....	55

# Índice de Figuras

Figura 1 - Vertentes e áreas de intervenção do sistema LiderA.....	9
Figura 2 - Indicadores da metodologia SBToolPT Urban .....	11
Figura 3 - Fases da análise do ciclo de vida.....	18
Figura 4 - Edifícios por época de construção .....	19
Figura 5 - Necessidade de reparação dos edifícios por época de construção .....	20
Figura 6 - Dados de certificação de edifícios residenciais .....	21
Figura 7 - Principais materiais utilizados na construção: Tipo de estrutura na construção por década .....	22
Figura 8 - Principais materiais utilizados na construção: Revestimento exterior por década .....	22
Figura 9 - Principais materiais utilizados na construção: Cobertura por década .....	23
Figura 10 - Consumo do setor residencial por fonte de energia .....	24
Figura 11 - Número de alojamentos por tipo de aquecimento e por fonte de energia .....	24
Figura 12 - O processo de decisão multicritério .....	26
Figura 13 - Definição de categorias no ELECTRE TRI. ....	30
Figura 14 - Aplicação do software IRIS.....	32
Figura 15 - Processo de produção do poliestireno extruído. ....	34
Figura 16 - Resultados da iteração inicial .....	41
Figura 17 - Resultados obtidos com a consideração das preferências do consumidor. ....	42
Figura 18 - Resultados obtidos com a consideração das preferências do decisor.....	43
Figura 19 - Resultados obtidos com a consideração ambiental. ....	44
Figura 20 - Resultados obtidos com a consideração de um exemplo de classificação. ....	45
Figura 21 - Resultados obtidos com a consideração ambiental e análise “cradle-to-grave”.....	46





# Índice de Tabelas

Tabela 1 - Categorias, indicadores e parâmetros usados no sistema BREEAM. ....	12
Tabela 2 - Áreas de avaliação e ponderação usados pelo sistema CASBEE. ....	13
Tabela 3 - Áreas de avaliação e parâmetros usados pelo sistema LEED. ....	14
Tabela 4 - Descrição das diferentes medidas consideradas. ....	27
Tabela 5 - Critérios de avaliação considerados ....	29
Tabela 6 - Parâmetros usados na avaliação das medidas - renovação de edifícios ....	32
Tabela 7 - Impacto das medidas na redução de consumos de energia ....	33
Tabela 8 - Escalas de avaliação dos critérios qualitativos ....	33
Tabela 9 - – Desempenhos das medidas selecionadas. ....	39
Tabela 10 - Perfis e limiares usados no software IRIS. ....	40



## Lista de acrónimos

AQS	Águas Quentes Sanitárias
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>
CASBEE	<i>Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency</i>
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
ELECTRE TRI	<i>ELimination Et Choix Traduisant la REalité</i>
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i>
GPL	Gás de Petróleo Liquefeito
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
INE	Instituto Nacional de Estatística
IRIS	<i>Intereactive Robustness analysis and parameters Interface for multicriteria Sorting problems</i>
LCA	<i>Life-Cycle Assessment</i>
LCC	<i>Life-Cycle Cost</i>
LED	<i>Light-emitting Diode</i>
LEED	<i>Leadership in Energy &amp; Environmental Design</i>
LiderA	Liderar pelo Ambiente para a construção sustentável
MCDA	<i>Multi Criteria Decision Analysis</i>
nZEB	<i>nearly zero-energy building</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PNAEE	Planos de Ação Nacionais de Eficiência Energética
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RJRU	Regulamento Jurídico da Reabilitação Urbana
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
TIR	Taxa Interna de Rentabilidade
VAL	Valor Atual Líquido
XPS	<i>Extruded Polystyrene</i>



# 1. Introdução

## 1.1. Contextualização

Nos últimos anos, o paradigma no setor da construção em Portugal tem vindo a seguir a tendência de outros países europeus, optando por favorecer as intervenções em reabilitação urbana em relação a novas construções. Esta mudança é sustentada por fatores económicos, como a crise de 2008 no setor da construção e por fatores políticos, devido à criação de incentivos com o intuito de revitalizar os centros das cidades, promovendo assim a integração social, cultural e ainda a requalificação ambiental.

De acordo com dados do Eurostat, em 2017, o setor residencial foi responsável pelo consumo de 16.84% do total de energia final. Atualmente, um dos maiores problemas da sociedade é o impacto associado à utilização de recursos primários não renováveis para a produção de energia, uma consequência direta do aumento da qualidade de vida e do aumento dos padrões de conforto.

A implementação de medidas de eficiência energética é um meio de mitigar o aumento do consumo de energia. Cabe às entidades reguladoras dinamizar e incentivar a utilização de tecnologias mais eficientes. Para isso, a criação de legislação e de programas de incentivos são ferramentas essenciais.

A nível europeu, a importância do setor da construção é evidente no número de políticas relacionadas com os materiais e produtos de construção dentro da Estratégia Europeia, incluindo regulamentos, diretrizes e iniciativas. A Diretiva nº 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios (*Energy Performance of Buildings Directive - EPBD*) estabeleceu diversos requisitos, nomeadamente que todos os Estados-Membros implementassem um sistema de certificação energética nos edifícios [1]. A reformulação desta primeira EPBD pela Diretiva 2010/31/UE [2], delineou os objetivos de aumentar a eficiência energética no setor dos edifícios, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub> e promovendo o uso de energias renováveis, de acordo com os compromissos assumidos com o Protocolo de Quioto. Nos termos desta nova Diretiva, devem ser incluídos certificados de desempenho energético de edifícios para venda ou arrendamento e todos os novos edifícios construídos após 31 de dezembro de 2020 devem cumprir padrões de construção com necessidades quase nulas de energia (nZEB - *nearly zero-energy building*). Ainda em conformidade com a EPBD de 2010, os Estados Membros devem estabelecer esquemas de inspeção para sistemas de aquecimento e ar condicionado, determinar os requisitos mínimos de desempenho energético para novos edifícios, para grandes reformas de edifícios e para a substituição ou modernização de

elementos dos edifícios e elaborar listas de medidas financeiras nacionais para aumentar a eficiência energética dos edifícios.

Na Diretiva relativa à Eficiência Energética [3], e no que respeita a eficiência energética dos edifícios, é reconhecida a necessidade de aumentar a taxa de renovação dos edifícios, uma vez a que o atual parque imobiliário constitui o setor com maior potencial de economia de energia e, além disso, os edifícios são considerados essenciais para atingir o objetivo da União Europeia que consiste em obter, até 2050, uma redução das emissões de gases com efeito de estufa de 80 % a 95 % em comparação com os níveis de 1990. Nos termos desta Diretiva, todos os anos, os Estados Membros devem realizar reformas energeticamente eficientes em pelo menos 3% dos edifícios pertencentes e ocupados pelo governo central e devem elaborar estratégias nacionais de renovação de edifícios a longo prazo que possam ser incluídas nos seus Planos de Ação Nacionais de Eficiência Energética (PNAEE). Estes Planos de Ação devem incluir: uma panorâmica do parque imobiliário nacional baseada, se adequado, numa amostragem estatística; uma identificação das abordagens rentáveis das renovações relevantes para o tipo de edifício e para a zona climática; políticas e medidas destinadas a incentivar renovações profundas de edifícios rentáveis, incluindo renovações profundas por etapas; uma perspetiva de futuro destinada a orientar a tomada de decisões em matéria de investimento por particulares, pela indústria da construção e pelas instituições financeiras e uma estimativa, com base em dados factuais, das economias de energia esperadas e de outros benefícios possíveis.

A Diretiva (UE) 2018/844 de 30 de maio de 2018, que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética, introduz alterações específicas que visam acelerar a renovação dos edifícios existentes, com o objetivo de obter um parque imobiliário descarbonizado até 2050 e a mobilização de investimentos.

No contexto nacional, em 1990, com o Decreto-Lei n.º 40/90, surgiu o primeiro regulamento sobre as características térmicas dos edifícios construídos após 1990, este regulamento, embora pouco exigente, serviu como uma base para a estruturação de regulamentos futuros. Mais tarde, em 2006 os Decretos-Lei n.º 79/2006 e o n.º 80/2006 ditaram que os requisitos de desempenho energético dos edifícios alvo de uma grande remodelação “Por grande remodelação ou alteração entendem-se as intervenções na envolvente ou nas instalações cujo custo seja superior a 25% do valor do edifício”, [4] que sejam idênticas às aplicadas em edifícios novos. Atualmente, a legislação portuguesa engloba num único diploma 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) [5]. Este diploma transpõe para a ordem jurídica nacional a Diretiva nº 2010/31/EU, relativa ao desempenho

energético dos edifícios, e visa assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios. A legislação é aplicável aos edifícios novos, aos edifícios existentes sujeitos a grandes intervenções e aos edifícios existentes e define princípios gerais, concretizados em requisitos específicos para os seguintes pilares: edifícios de habitação - o comportamento térmico e a eficiência dos sistemas; edifícios de comércio e serviços - a instalação, a condução e a manutenção de sistemas técnicos.

De acordo com o Decreto-Lei n.º 307/2009, presente no Regulamento Jurídico da Reabilitação Urbana (RJRU), a reabilitação urbana é classificada como “Uma componente indispensável da política das cidades e da política de habitação, na medida em que nela convergem os objetivos de requalificação e revitalização das cidades, em particular das suas áreas mais degradadas, e de qualificação do parque habitacional, procurando-se um funcionamento globalmente mais harmonioso e sustentável das cidades e a garantia, para todos, de uma habitação condigna.” O Decreto-Lei n.º 95/2019 vem estabelecer o regime aplicável às operações de reabilitação de edifícios ou de frações autónomas. Neste decreto, além das preocupações relacionadas com o aumento da eficiência energética, é de notar a relevância dada ao ciclo de vida dos materiais e aos processos relacionados com a reabilitação. No ponto inicial do Artigo 5º pode ler-se “A atividade de reabilitação deve ser orientada para a minimização do seu impacto ambiental, assumindo o desígnio da preservação dos recursos naturais e da biodiversidade, com particular incidência na redução da extração e processamento de matérias-primas, produção de resíduos e emissão de gases nocivos”. Os segundo e terceiro pontos são também bastante relevantes, sendo abordado no terceiro ponto o fim da vida útil dos componentes ou partes da construção.

A reabilitação de edifícios, de um ponto de vista energético, tem como principal objetivo a redução do consumo de energia, mantendo um nível elevado de conforto térmico, sendo, para isso, utilizadas, por exemplo, tecnologias e equipamentos mais eficientes. A redução de consumos de energia deve ser sempre condicionada pelos requisitos ocupacionais, como a qualidade do ar e o conforto térmico.

Porém, a identificação, a seleção e avaliação da combinação das medidas de reabilitação para edifícios é um processo complexo [6][7][8], já que envolve vários eixos de atuação (várias medidas de reabilitação energética: renovação da envolvente, utilização de sistemas, equipamentos e/ou tecnologias mais eficientes que, por sua vez, podem ser concretizadas com diferentes materiais/tecnologias), diferentes critérios de avaliação (económicos: investimento, tempo de retorno, redução da fatura energética, custos de operação e manutenção; ambientais: redução de emissões e outros impactos ambientais; sociais: nível de conforto, qualidade do ar interior; técnicos e legislativos), muitas vezes conflituosos entre si, diferentes tipologias de edifícios (com

localização, utilização e ano de construção diversas) e diferentes partes interessadas (proprietários, utilizadores, investidores), com diferentes objetivos no processo de reabilitação.

Torna-se, pois, necessário o recurso a metodologias que permitam apoiar os decisores no processo de seleção das medidas de reabilitação energética de edifícios, por forma a maximizar os benefícios dessa reabilitação. No entanto, para a redução do uso de energia e dos impactos ambientais associados aos edifícios, é fundamental contemplar uma abordagem baseada na sustentabilidade ambiental, baseada na avaliação do ciclo de vida (*Life-Cycle Assessment - LCA*), abrangendo todas as etapas do ciclo de vida, “*from cradle to grave*”, e não apenas as fases de manufatura dos equipamentos e/ou operação do edifício, tradicionalmente consideradas [9][10].

## 1.2. Objetivos

Esta dissertação teve como principal objetivo a identificação e avaliação de medidas de reabilitação energética de edifícios residenciais, tendo em consideração diferentes áreas de atuação e diferentes critérios de avaliação, que possam apoiar os decisores políticos na seleção das medidas com maior potencial de implementação e que poderão ser alvo de apoio e/ou financiamento público

A identificação e seleção das medidas teve em consideração diferentes áreas de intervenção (melhoria do isolamento das fachadas opacas e coberturas e substituição de janelas; substituição de tecnologias de iluminação, de climatização e de produção de água quente sanitária), diferentes tipologias de edifícios residenciais e diferentes épocas de construção.

Para o processo de avaliação das medidas selecionadas foram considerados cinco critérios de diferente natureza: investimento inicial, redução de consumos de energia, impactos durante o ciclo de vida, capacidade de penetração no mercado na ausência de incentivos e adequação para serem suportadas por políticas públicas de promoção da eficiência energética.

A seleção das medidas de reabilitação energética a avaliar e dos critérios de avaliação teve em consideração a informação recolhida junto de vários peritos durante a realização de uma oficina de trabalho no âmbito do projeto T4-ENERTEC- Tools for supporting the selection of energy efficient technologies (Ferramentas de apoio à seleção de tecnologias energeticamente eficientes) -POCI-01-0145-FEDER-029820; que teve lugar em 28 novembro 2018.

A avaliação das medidas selecionadas é feita com recurso a uma metodologia com base em análise multicritério que se afigurou adequada, uma vez que permite incluir a diversidade dos aspetos de avaliação e a utilização de diferentes escalas (quantitativas e qualitativas) para os



diferentes critérios e proporcionam um ambiente de tomada de decisão participativo, permitindo a intervenção dos vários especialistas e das partes interessadas.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

O documento está organizado em seis capítulos. Inicialmente, neste primeiro capítulo, é realizado um enquadramento de toda a dissertação.

No segundo capítulo é realizada uma revisão da literatura sobre as metodologias utilizadas na avaliação da eficiência energética na construção de edifícios e na avaliação de medidas de eficiência energética. Este capítulo inclui a metodologia de análise de ciclo de vida das medidas.

O terceiro capítulo contém a caracterização do parque habitacional do sector residencial de Portugal. Aqui são abordados aspetos construtivos ao longo de diferentes décadas e são também caracterizados os consumos.

No quarto capítulo é construída a metodologia de avaliação. Para isso, é selecionada a metodologia, os critérios e o conjunto de medidas a avaliar.

No quinto capítulo são analisados os resultados da metodologia desenvolvida no capítulo anterior. Começam por definir-se os desempenhos e limiares para as medidas selecionadas e, depois, recorrendo ao *software* IRIS são testados diferentes cenários.

O sexto capítulo tece conclusões face ao trabalho realizado, sendo também indicadas propostas de trabalhos futuros.



## 2. Revisão de literatura

A avaliação do nível de eficiência energética dos edifícios é um passo importante na direção da sustentabilidade energética. Esta avaliação permite identificar e avaliar a utilização eficiente de energia e recursos.

Alguns dos métodos que têm sido desenvolvidos e aplicados para a avaliação do desempenho ambiental dos edifícios em diversos países são apresentados neste capítulo.

Referem-se, igualmente, neste capítulo, algumas metodologias usadas para a avaliação de medidas de eficiência energética em edifícios residenciais, com base em alguns trabalhos científicos publicados.

### 2.1. Metodologias de avaliação de eficiência na construção

A construção sustentável tem por base uma série de indicadores e parâmetros que se enquadram nas diferentes dimensões do desenvolvimento sustentável: ambiental, económica, social e cultural [11]. As metodologias de avaliação da sustentabilidade dos edifícios atualmente existentes, baseiam a sua avaliação em indicadores e parâmetros que são considerados mais representativos para objetivos da avaliação. A classificação sustentável e o perfil sustentável de um edifício resultam dum processo no qual os indicadores mais importantes são identificados, analisados e avaliados [11].

De acordo com o Portal da habitação [12] existem vários sistemas internacionais para a avaliação ambiental dos edifícios, entre eles: o *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM) desenvolvido no Reino Unido, o *Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency* (CASBEE), desenvolvido no Japão e o *Leadership in Energy & Environmental Design* (LEED), desenvolvido nos Estados Unidos da América.

Os sistemas e ferramentas de avaliação e reconhecimento da construção sustentável têm como objetivo garantir a sustentabilidade dos edifícios durante a totalidade do seu ciclo de vida (projeto, construção, operação, manutenção, demolição/desconstrução), promovendo e tornando possível uma melhor integração entre os parâmetros ambientais, sociais, funcionais, económicos e outros critérios convencionais [11]. A maior parte dos sistemas de avaliação e reconhecimento de edifícios sustentáveis são baseados nos regulamentos e legislação local, em soluções construtivas convencionais e o peso de cada parâmetro e indicador na avaliação é predefinido de acordo com as realidades sociocultural, ambiental e económica do local, pelo que, a maior parte deles só pode ter reflexo às escalas local ou regional.

Embora os sistemas e ferramentas de avaliação e reconhecimento da construção sustentável possam ser aplicados ao caso português, existem dois métodos de avaliação da sustentabilidade de edifícios com características direcionadas à realidade portuguesa: o “Liderar pelo Ambiente para a Construção Sustentável”, LiderA e a “Metodologia de Avaliação de Sustentabilidade Urbana”, SBToolPT.

### **2.1.1. Método LiderA**

O LiderA, acrónimo de Liderar pelo Ambiente para a construção sustentável, é um sistema de avaliação da sustentabilidade da construção que tem como principal objetivo apoiar a procura da sustentabilidade em edifícios e espaços de intervenção [13].

O LiderA estabelece seis princípios de bom desempenho ambiental que abrangem as seis vertentes consideradas no sistema e mostradas na Figura 1: valorização da dinâmica local e promover uma adequada integração; fomento da eficiência no uso dos recursos; redução do impacto das cargas (quer em valor, quer em toxicidade); garantia da qualidade do ambiente, focada no conforto ambiental; fomento das vivências socioeconómicas sustentáveis; garantia da melhor utilização sustentável dos ambientes construídos, através da gestão ambiental e da inovação. As seis vertentes são traduzidas para vinte e duas áreas de avaliação (eixo vertical da Figura 1) e quarenta e três parâmetros, que são usados na avaliação dos edifícios em função do seu desempenho a nível da sustentabilidade.

Para obter o valor final da classificação são consideradas as ponderações por área, indicadas em percentagem na Figura 1. Como se pode observar, a maior importância é dada à energia (17%), seguido da água (8%) e do solo (7%).

O sistema classifica o desempenho de A a G, sendo que o nível E representa a prática usual e o nível A representa o melhor desempenho ambiental. Para o sistema LiderA o grau de sustentabilidade é mensurável e passível de ser certificado em classes de bom desempenho, sendo elas C, B, A, A+ e A++ [13].

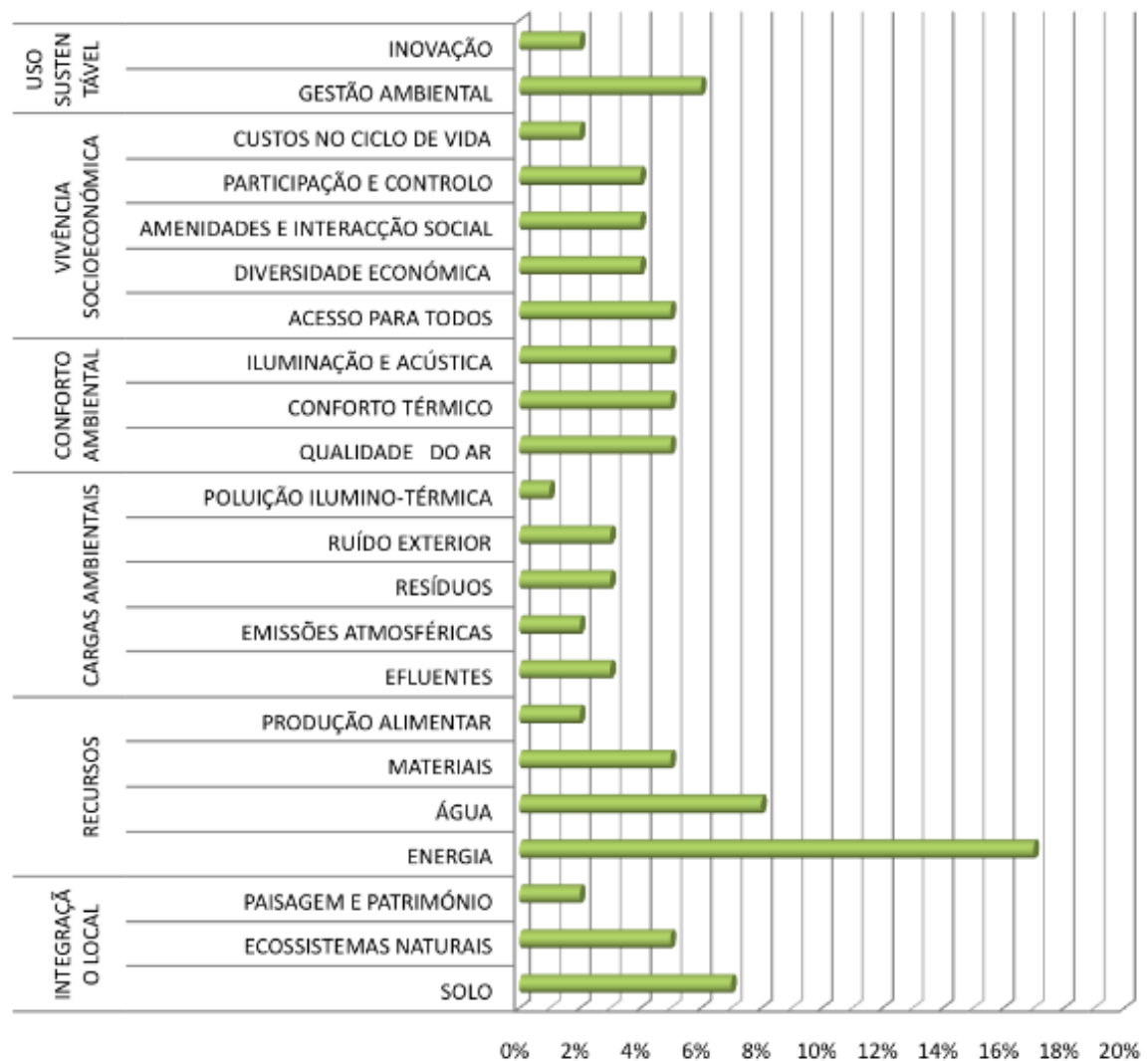


Figura 1 - Vertentes e áreas de intervenção do sistema LiderA[14]

### 2.1.2. Metodologia SBTool<sup>PT</sup>Urban

A metodologia SBTool<sup>PT</sup>Urban é uma ferramenta de avaliação de sustentabilidade urbana, desenvolvida para Portugal [15]. Tendo por base os princípios de sustentabilidade defendidos pela organização não-governamental “*International Initiative for a Sustainable Built Environment – iiSBE*”, o método de avaliação de sustentabilidade da SBTool usa como termos de referência as condições específicas do ambiente construído em Portugal, constituindo um instrumento para a gestão e planeamento urbano com o objetivo de melhorar a organização do espaço, auxiliar na preservação e melhoria da qualidade do meio ambiente e da qualidade de vida em meio urbano [15].

O conjunto de indicadores de avaliação considerado nesta metodologia, são agrupados em diversas categorias, de acordo com a dimensão de sustentabilidade com a qual se relacionam: ambiental, social e económica [15]. A Figura 2 representa a estrutura geral de avaliação da

metodologia. Foram definidos 41 indicadores, divididos entre 13 categorias, sendo uma relativa a pontos-extra, inseridos em 3 dimensões fundamentais da sustentabilidade (ambiental, social e económica). As categorias agrupam os indicadores consoante questões comuns entre ambos, e podem também ser observadas do ponto de vista de uma análise de ciclo de vida. Por fim, os indicadores referenciam os impactos associados a aspetos específicos dentro da abrangência da respetiva categoria.

Para determinar o desempenho global de uma área urbana, em termos de sustentabilidade, os valores individuais obtidos para cada indicador são adicionados através de um sistema de ponderação, no qual são atribuídos diferentes níveis de relevância dos indicadores, categorias e dimensões na formação da classificação final[15]. Com base na avaliação efetuada, a comunicação dos resultados é realizada através da emissão de um certificado de sustentabilidade para o projeto, baseado numa escala de letras compreendida entre “E” (o menos sustentável/abaixo do valor convencional de referência) e “A+” (o mais sustentável/acima do valor da melhor prática de referência). O nível “D” corresponde à prática convencional e o “A” à melhor prática[15].

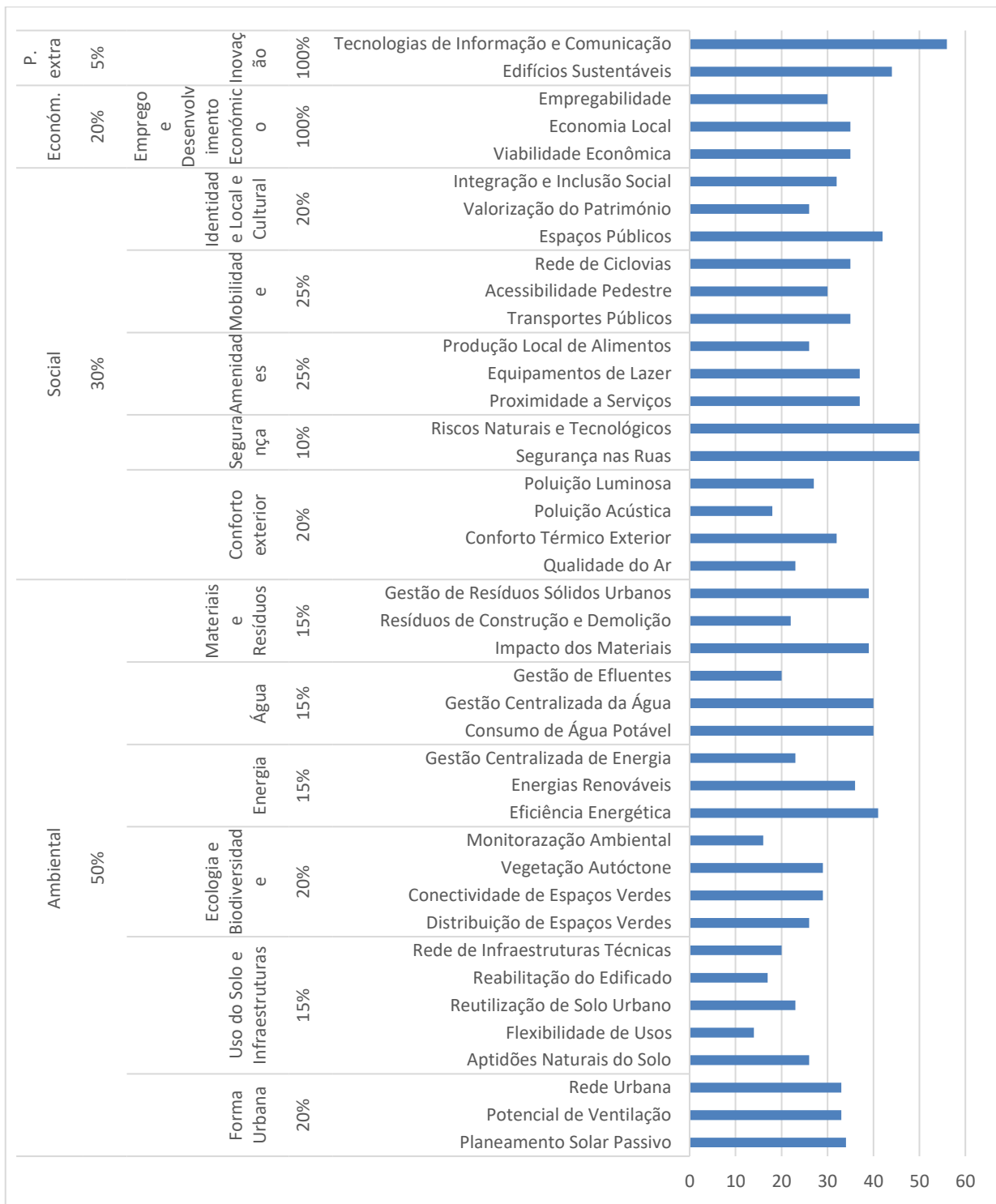


Figura 2 - Indicadores da metodologia SBTtoolPT Urban (adaptado de [15]).

### 2.1.3. Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM)

O método BREEAM, lançado no Reino Unido em 1990, foi o primeiro método de avaliação do desempenho ambiental de edifícios. A avaliação e certificação podem ser efetuadas em

diferentes etapas, desde o projeto inicial, passando pela construção, utilização ou ainda em projetos de reabilitação.[16]

O sistema de classificação deste método é baseado em dez categorias apresentadas na Tabela 2.1, juntamente com a respetiva pontuação máxima (créditos) e ponderação.

*Tabela 1 - Categorias, indicadores e parâmetros usados no sistema BREEAM.*

<b>Categorias</b>	<b>Indicadores e parâmetros</b>	<b>Pontuação máxima</b>	<b>Ponderação</b>
<b>Gestão da Construção</b>	Adjudicação Impacto no local da construção Segurança	11	12%
<b>Gestão de Resíduos</b>	Resíduos da construção Agregados reciclados Instalações de reciclagem	7	7.5%
<b>Saúde e Bem-Estar</b>	Iluminação natural Conforto térmico dos ocupantes Acústica Qualidade do ar interior e da água	14	15%
<b>Contaminação</b>	Emissões de gases de efeito de estufa Poluição dos cursos de água Luz externa e poluição sonora	12	10%
<b>Consumo de Energia</b>	Emissões de CO <sub>2</sub> Isolamento do edifício Sistemas de elevada eficiência energética Iluminação externa	24	19%
<b>Consumo de Água</b>	Consumo de água Deteção de fugas Reutilização e reciclagem de água	9	6%
<b>Utilização de Terreno e Ecologia</b>	Valor ecológico do local Proteção das características ecológicas Valorização ecológica Pegada do edifício	10	10%
<b>Transportes</b>	Conexão da rede de transportes públicos Instalações para peões e ciclistas Infraestruturas de lazer Planos e informações sobre viagens	9	8%
<b>Materiais</b>	Incorporação do ciclo de vida Reutilização de materiais Robustez	13	12.5%
<b>Inovação</b>	Níveis exemplares de desempenho Utilização de profissionais acreditados Novas tecnologias construtivas	10	10%

Um projeto avaliado com o método BREEAM pode alcançar 109 créditos, sendo que a categoria inovação possibilita a obtenção de uma bonificação de até 10 créditos. A percentagem mínima para obter o certificado BREEAM® é de 30% (equivalente a 33 créditos).

Para calcular a classificação final são atribuídos pesos às categorias, esses pesos são multiplicados pela sua pontuação de forma a obter um resultado final seguindo a escala: Sem certificação (pontuação inferior a 30%, equivalente a 33 créditos); Aprovado (pontuação igual ou



superior a 30%); Bom (pontuação igual ou superior a 45%); Muito bom (pontuação igual ou superior a 55%); Excelente (pontuação igual ou superior a 70%); e Excepcional (pontuação igual ou superior a 85%)[17].

#### **2.1.4. Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency (CASBEE)**

O método CASBEE, desenvolvido em 2001 no Japão tem como missão reduzir o consumo de recursos e as pressões ambientais associadas ao ciclo de vida do edificado, preocupando-se também com o aumento da qualidade de vida das populações[18].

O sistema de avaliação deste método contempla seis áreas, apresentadas na Tabela 2.2, juntamente com a respetiva ponderação.

*Tabela 2 - Áreas de avaliação e ponderação usados pelo sistema CASBEE.*

<b>Áreas de avaliação</b>	<b>Ponderação</b>
Ambiente interior	20%
Qualidade dos serviços	15%
Ambiente externo dentro do lote do edifício	15%
Energia	20%
Recursos e materiais	15%
Ambiente externo fora do lote do edifício	15%

O processo de avaliação estabelece uma relação entre dois tipos de fatores:

- Q (qualidade ambiental) – Qualidade e desempenho do ambiente e serviços dentro do espaço do edificado, até aos limites do terreno.
- L (cargas ambientais) – Impactos negativos, incluindo utilização de energia e recursos. Neste fator é incluído o impacto no espaço público exterior ao terreno.

A eficiência ambiental do edifício é calculada através do quociente Q/L. Quanto maior for o quociente, maior será a sustentabilidade ambiental. A classificação de desempenho dos edifícios do CASBEE é constituída por cinco níveis: S (superior), A, B+, B e C, sendo S a melhor classificação[18]

## 2.1.5. Leadership in Energy & Environmental Design (LEED)

A metodologia LEED, desenvolvida em 2000 no Estados Unidos, é uma ferramenta de certificação energética com o objetivo de fomentar a utilização eficiente de recursos. Esta metodologia compete com a BREEAM, referida anteriormente, e pode ser aplicada durante a fase de projeto, construção, operação e manutenção[19].

O sistema de avaliação da metodologia LEED contempla oito áreas, apresentadas na Tabela 3, juntamente com a respetiva pontuação máxima (variável de acordo com o tipo de construção) e ponderação.

*Tabela 3 - Áreas de avaliação e parâmetros usados pelo sistema LEED.[19][17]*

<b>Categoria</b>	<b>Pontuação máxima</b>	<b>Ponderação</b>
Localização e Transportes	17	(15.5%)
Sustentabilidade Local	9	(8.2%)
Eficiência Hídrica	13	(11.8%)
Energia e Atmosfera	30	(27.3%)
Materiais e Recursos	9	(8.2%)
Qualidade Ambiental Interior	18	(16.4%)
Inovação	6	(5.5%)
Prioridade Regional	6	(3.6%)

De acordo com a pontuação obtida, são propostos diferentes níveis de certificação, válidos por um período de cinco anos: Certificado (de 40 a 49 pontos), Prata (de 50 a 59 pontos), Ouro (de 60 a 79 pontos), Platina (igual ou superior a 80 pontos)[17][19].

## 2.2. Metodologias de avaliação de medidas de eficiência energética em edifícios residenciais.

Vários trabalhos têm sido divulgados referentes à identificação e à avaliação dos impactos de medidas de eficiência energética em edifícios residenciais. Estes trabalhos utilizam diferentes metodologias, contemplam diferentes medidas e têm sido aplicadas em diferentes partes do globo.

São apresentadas metodologias de avaliação com base em análise multicritério em [17][20][21][22]. No estudo apresentado em [17], o autor aplica uma metodologia multicritério para a avaliação de medidas de eficiência energética que possam ser implementadas no setor residencial em Portugal. A aplicação da metodologia tem em consideração quatro áreas de

intervenção (iluminação, climatização, AQS e reabilitação de espaços) e considera 5 critérios (económicos - custo do investimento e período de retorno do investimento; técnicos - redução dos consumos de energia; ambientais - redução das emissões de CO<sub>2</sub>, resultante da poupança energética conseguida; sociais - a aceitação por parte dos consumidores), tendo sido usado o método de classificação segundo categorias ordenadas predefinidas ELECTRE TRI (*ELimination Et Choix Traduisant la REalité*) para o processo de avaliação.

Em [20] é sugerida a utilização de uma metodologia multicritério com o intuito de analisar soluções de renovação, aplicadas a diferentes edifícios do setor residencial. A avaliação do ciclo de vida (LCA) e o custo do ciclo de vida (LCC) são combinados expressando os impactos ambientais em valores monetários. A metodologia permite avaliar diferentes medidas de economia de energia de uma perspetiva ambiental e financeira através da abordagem do ciclo de vida e foi ilustrada usando como estudo de caso um edifício residencial representativo do conjunto habitacional espanhol.

O trabalho descrito em [21] utiliza a metodologia multicritério PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) para fornecer uma diretriz para classificar diferentes alternativas de renovação de edifícios residenciais em Turin, Itália. A metodologia multicritério proposta contempla 6 critérios (3 critérios expressos em unidade monetária: custo de investimento; redução da fatura energética; custo de substituição e de manutenção; e 3 critérios expressos numa escala qualitativa: confiabilidade por parte dos proprietários; melhoria do conforto térmico; imagem social) para avaliação de 5 medidas em áreas diferentes de intervenção: isolamento da envolvente; instalação de sistemas de controlo; sistemas de aquecimento; instalação de ventilação mecânica e instalação de painéis fotovoltaicos.

Um método multicritério para a avaliação dos impactos económicos, ambientais e sociais de diferentes medidas de eficiência energética para os edifícios residenciais é apresentada em [22]. A metodologia, aplicada no sul de Espanha, baseia-se na análise integrada de variáveis ambientais e económicas existentes e novas, juntamente com novas variáveis sociais, por meio de novos indicadores denominados Índices de Efetividade. O método permite melhorar a gestão das decisões relativas às medidas de eficiência energética no setor residencial, através da identificação das soluções mais eficazes de acordo com os requisitos e necessidades de cada agente interveniente ou parte interessada.

Diferentes estudos têm usado métodos multiobjectivo para a avaliação dos impactos de medidas de eficiência energética em edifícios residenciais, a sua descrição encontra-se em [23][24][25][26]. A metodologia descrita em [23] inclui uma abordagem *bottom-up* no âmbito de um modelo *Input-Output* para a determinação das opções de investimento destinadas a melhorar as propriedades térmicas do envolvente do edifício (por exemplo, o isolamento de paredes e

telhados externos e a substituição de caixilhos de janelas e vidros). Aplicada no contexto urbano português, a metodologia permite avaliar os *trade-offs* entre o emprego, o Produto Interno Bruto (PIB) e a economia de energia associados ao setor dos edifícios residenciais e de serviços.

Uma metodologia para determinar a espessura ideal de isolamento para as superfícies externas de edifícios é apresentada em [24]. A abordagem é baseada num modelo de otimização multiobjectivo que minimiza simultaneamente o custo de investimento e onze indicadores de impacto ambiental associados ao consumo de energia durante a fase operacional e aos materiais de construção utilizados. A metodologia foi aplicada a um edifício representativo, situado em Lleida, Espanha.

Em [25] os autores analisaram um conjunto de edifícios residenciais de referência com o objetivo de investigarem a influência das características dos edifícios de referência na definição de soluções ideais de renovação, considerando os desempenhos económico, energético e de conforto. Uma otimização multiobjectivo foi realizada usando um algoritmo genético (NSGA-II) combinado com uma ferramenta de simulação dinâmica para investigar as estratégias mais promissoras, capazes de otimizar os três objetivos referidos em edifícios residenciais.

Um trabalho mais recente, apresentado em [26], propõe um modelo de otimização multiobjectivo para a tomada de decisão de investimentos em medidas de renovação de edifícios existentes. O Valor Atual Líquido (VAL) e o tempo de retorno do processo de renovação foram selecionados como objetivos a otimizar, a par com a economia de energia e a redução de emissões. A validação do modelo foi feita através de um estudo empírico realizado em 27 edifícios no estado de Delaware, nos Estados Unidos da América.

### **2.2.1. Métodos de simulação computacional**

Os métodos de simulação computacional fornecem uma ajuda importante na análise técnica e económica das medidas de eficiência energética em edifícios. Neste contexto, [27] discute os efeitos sobre a eficiência energética e económica em edifícios residenciais em Trabzon, Turquia, através da renovação das janelas, com recurso ao *software* de simulação dinâmica de edifícios – *DesignBuilder*. Este *software* de simulação é também usado no processo de priorização de medidas de conservação de energia de um edifício residencial australiano apresentado em [28]. O *software* DesignBuilder foi usado para a quantificação dos benefícios energéticos de cada medida, sendo posteriormente realizada uma avaliação económica com base no VAL, na Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) e no período de retorno do investimento.

O modelo de simulação *TRNSYS* é usado em [29] para realizar a análise energética e económica de várias medidas de economia de energia que incluem o isolamento de fachadas e telhados e a

substituição de janelas. Para essa análise, foi selecionado um edifício existente localizado em Bilbao, Espanha. O modelo de simulação *TRNSYS* é ainda usado em [30]. Os autores apresentam os resultados de um método detalhado para o desenvolvimento de estudos de custo ótimo para as medidas de eficiência energética em edifícios residenciais. O método, aplicado a um edifício multifamiliar localizado em Barcelona, Espanha, fornece informações técnicas e económicas sobre as medidas de eficiência energética consideradas (aquecimento, água quente sanitária, refrigeração, iluminação e eletrodomésticos, com o objetivo de apoiar o processo de decisão.

### 2.2.2. Métodos de avaliação do ciclo de vida

A utilização de abordagens que incluam a avaliação do ciclo de vida (*Life-Cycle Assessment - LCA*) torna-se fundamental para a análise energética e ambiental dos edifícios.

Os impactos ambientais causados pela atividade humana podem ser mais facilmente quantificados quando é conhecida a quantidade de recursos e energia utilizados em cada etapa da vida de um produto, o mesmo aplica-se aos resíduos e poluentes gerados. O conhecimento destes fatores possibilita a tomada de decisões com o intuito de mitigar os impactos no meio ambiente. Assim sendo, faz todo o sentido que o processo de avaliação dos impactos das atividades humanas seja o mais abrangente possível, no sentido em que deve abarcar, não só a utilização de uma dada tecnologia, mas também todos os impactos decorrentes das fases (fabrico, construção e distribuição) antes de ter a tecnologia disponível e também das fases de desmantelamento,

Quando se avalia a eficiência energética, inevitavelmente surgem questões relacionadas com o ciclo de vida. Sempre que um bem ou um serviço chega a um cliente são necessárias várias etapas onde existe consumo de energia. A energia é consumida desde a fase mais inicial onde são extraídas matérias primas, passando por todas as fases de transporte, fabricação, utilização, até o produto ou serviço chegar ao fim de vida onde poderá, ou não, ser reciclado.[31]

De acordo com o ISO 14040[32], a análise do ciclo de vida divide-se em quatro etapas como esquematizado na Figura 3:

- **Etapa 1:** Definição de objetivos e fronteiras do sistema tem como objetivo definir qual o contexto do estudo bem como quais os limites do ciclo de vida do produto.
- **Etapa 2:** Nesta etapa é realizada uma análise do inventário onde são descritos todos os materiais e fluxos de energia envolvidos no sistema. Nesta etapa estão incluídas todas as interações com o ambiente.
- **Etapa 3:** Utilizando os dados da análise de inventário é possível nesta etapa detalhar e classificar as categorias de avaliação dos impactos.
- **Etapa 4:** Interpretação e análise crítica dos dados de forma a obter resultados

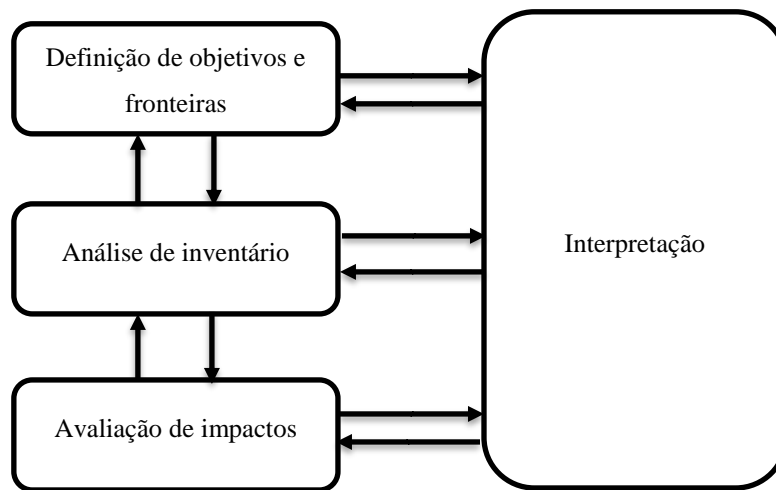


Figura 3 - Fases da análise do ciclo de vida

Referem-se as duas variantes da LCA que serão usadas neste trabalho, na avaliação das medidas de eficiência energética selecionadas (capítulo 4). A primeira, “*cradle-to-grave*”, é a avaliação do ciclo de vida completo, desde a extração da matéria-prima, passando pela produção, transporte, utilização e por fim o tratamento de resíduos. A segunda variação é a análise “*cradle-to-gate*”, que contempla apenas as fases de extração de matéria-prima e produção, terminando no momento em que o produto sai dos portões da fábrica.

O indicador utilizado para quantificar o impacto durante o ciclo de vida foi o potencial de aquecimento global (GWP) cuja unidade é o  $\text{kgCO}_2\text{eq}$ . Este indicador é utilizado como uma métrica para comparar, relativamente a outro gás, a capacidade que um gás de efeito de estufa tem para armazenar calor na atmosfera. O gás utilizado como referência é o  $\text{CO}_2$ . A título de exemplo, o GWP do gás metano é 21 vezes superior ao  $\text{CO}_2$ , podendo então afirmar-se que o metano tem um GWP de 21  $\text{kgCO}_2\text{eq}$  para um período de 100 anos (este indicador está normalmente associado a um período temporal, tipicamente 20 ou 100 anos) [33].

Uma revisão atualizada da literatura sobre a utilização de LCA na renovação e na reforma de diferentes tipos de edifícios é apresentada em [9]. A análise feita pelos autores mostra que a maioria das avaliações do ciclo de vida se centra na comparação dos impactos ambientais antes e depois da reforma/renovação dos edifícios. Por outro lado, os estágios do ciclo de vida estudados com mais frequência são aqueles relacionados com as fases de manufatura dos equipamentos e do funcionamento do edifício. Da mesma forma, as categorias de impacto mais consideradas são o potencial de aquecimento global (GWP) e a energia incorporada.

Num trabalho mais recente [10], os autores fazem a análise de 4 cenários de renovação para um edifício residencial em Borlänge, Suécia, abrangendo todas as etapas do ciclo de vida, “*from cradle to grave*”. Os 4 cenários analisados incluíram a redução da temperatura interior, a melhoria das propriedades térmicas dos materiais de construção e a recuperação de calor.

### 3. Caracterização do sector residencial em Portugal

Neste capítulo pretende-se apresentar uma caracterização do parque habitacional do setor residencial em Portugal, considerando como critérios: a época de construção; as necessidades de reparação; a classificação energética; os materiais de construção e os dados de consumos de energia. A caracterização do edificado é crucial na determinação das necessidades energéticas e na identificação de possíveis pontos de melhoria em termos de eficiência energética.

#### 3.1. Caracterização do edificado

De acordo com o INE, em 2017, o parque habitacional português foi estimado em 3 598 691 edifícios e 5 944 466 alojamentos familiares clássicos [34]. O parque habitacional do país cresceu a uma taxa anual média superior a 1% até 2008. A partir desse ano, as taxas de variação têm vindo a desacelerar, tendo em 2017 obtido um crescimento de 0.19% nos edifícios e 0.16% nos alojamentos, face a 2016.

De acordo com os Censos de 2011, do total de alojamentos contabilizados, 19.39% são de residência secundária e 12.55% encontram-se vagos [35]. O total de alojamentos familiares clássicos utilizados como residência situa-se assim nos 3 991 112.

Em 2018, o número médio de habitantes por alojamento situa-se em 1.7 indivíduos. Os alojamentos têm uma tipologia predominante T3, com aproximadamente 5 divisões e uma área média útil de 109m<sup>2</sup>. [36]

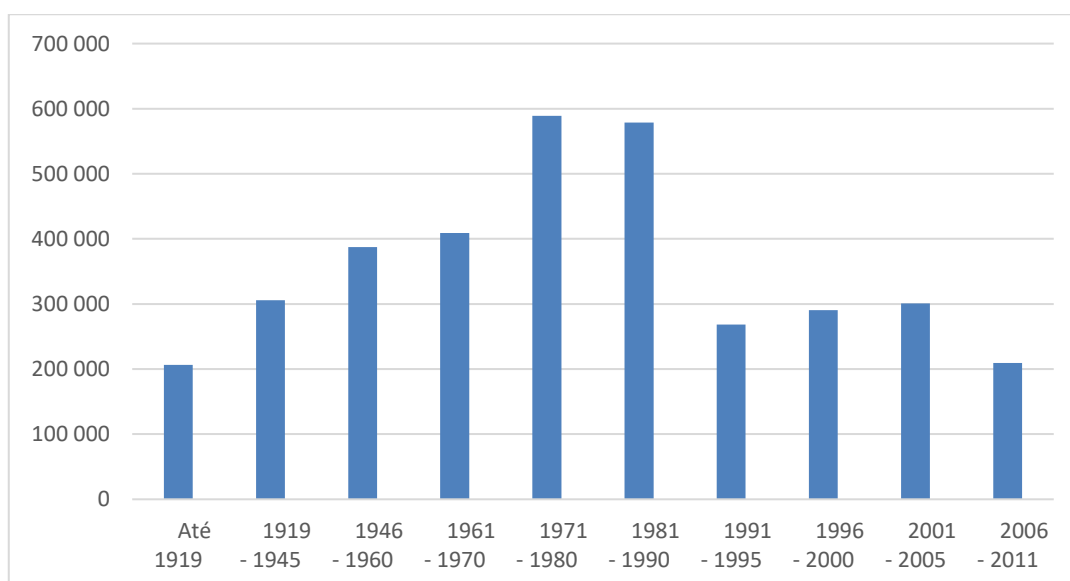


Figura 4 - Edifícios por época de construção (adaptado de [35])

Observando a Figura 4, é possível verificar que 63.1% dos edifícios do parque foram construídos depois de 1971, tendo a maior parte sido construída nas décadas de 70 e 80.

Na Figura 5 indica-se o número de edifícios, por data de construção, com necessidade de reparação. Comparando os dados da Figura 4 com os apresentados na Figura 5 pode verificar-se que os edifícios construídos nas décadas de 1960 e 1970 são os que apresentam o maior peso na necessidade de reparação, sendo também os que oferecem melhores possibilidades de implementar medidas que potenciam a eficiência energética.

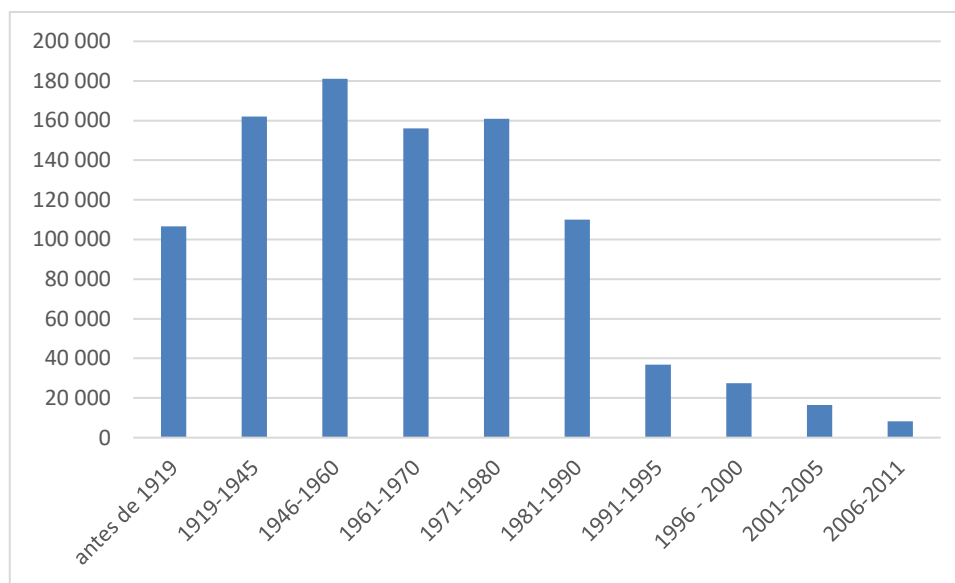


Figura 5 - Necessidade de reparação dos edifícios por época de construção (adaptado de [35])

O grande potencial de implementação de medidas que melhorem o desempenho energético dos edifícios residenciais pode também ser constatado analisando os dados relativos ao sistema de certificação energética do edificado. Desde dezembro de 2013 que a certificação energética dos edifícios é obrigatória sempre que um imóvel é vendido ou arrendado. A classificação varia entre o nível A+, o mais eficiente e o G, o menos eficiente. O certificado energético tem uma duração de 10 anos.

Existem três aspetos principais para atribuir um nível de eficiência. O primeiro aspeto está relacionado com a eficiência do isolamento térmico. Neste ponto são avaliadas a qualidade das paredes e as janelas do edifício. O segundo aspeto avalia a eficiência dos eletrodomésticos e equipamentos utilizados. Por fim, o terceiro aspeto diz respeito à utilização de energias renováveis e ao seu contributo.

De acordo com dados da ADENE – Agência para a energia, responsável por gerar a certificação energética dos edifícios, apresentados na Figura 6, cerca de 73% das habitações presentemente certificadas encontram-se abaixo do nível B-, o nível mínimo exigido na construção



de novos edifícios [37] existindo, assim, um grande potencial para a melhoria da eficiência energética nos edifícios mais antigos.

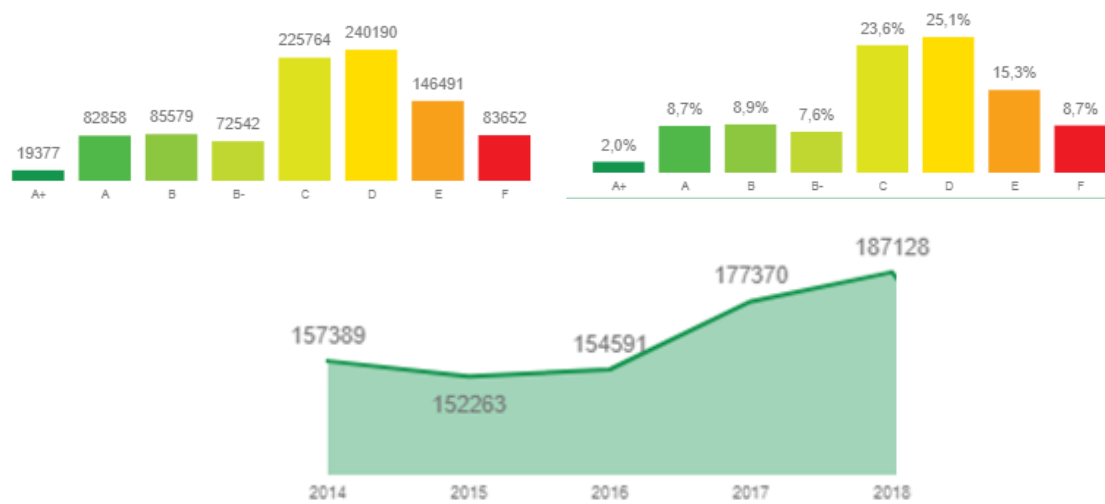


Figura 6 - Dados de certificação de edifícios residenciais [38]

O tipo de material utilizado na construção tem uma importância muito significativa, uma vez que está diretamente associado ao desempenho energético do edifício. O nível de isolamento e a inércia térmica são as principais características do material e das técnicas de construção utilizadas. Um bom nível de isolamento do exterior do edifício previne a transferência de calor por condução pelas fronteiras, afetando diretamente a quantidade de energia necessária para manter o nível de conforto adequado. A inércia térmica é uma característica própria dos materiais que está relacionada com a transferência de calor entre o ambiente externo e interno, a sua principal função é contrariar os picos de temperatura entre o meio interior e exterior[39]. A inércia térmica de uma parede varia com a sua espessura e o tipo de material utilizado, sendo superior para materiais como o betão.

Na Figura 7 identificam-se os principais materiais utilizados na construção por década de acordo com o tipo de estrutura na construção.

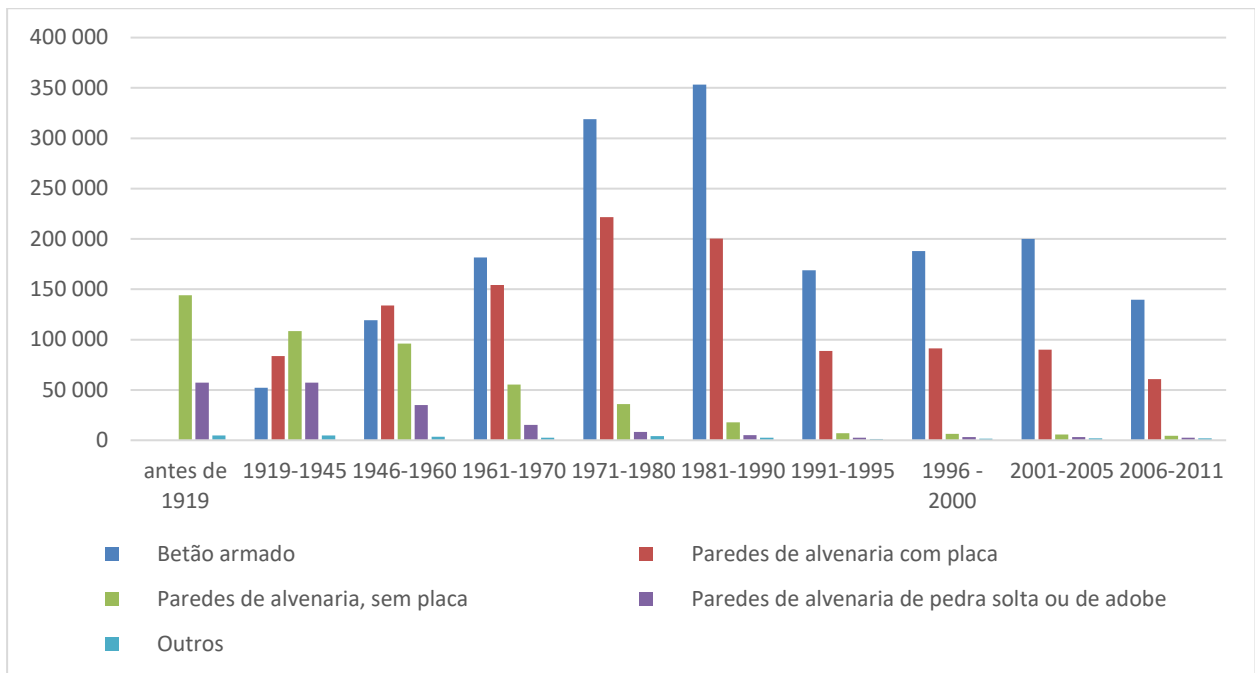


Figura 7 - Principais materiais utilizados na construção: Tipo de estrutura na construção por década [35]

Observando a Figura 7 é possível verificar que os materiais mais utilizados desde 1961 são o betão armado, que ocupa um lugar dominante desde a década de 60. Em segundo lugar, surgem as paredes de alvenaria com placa.

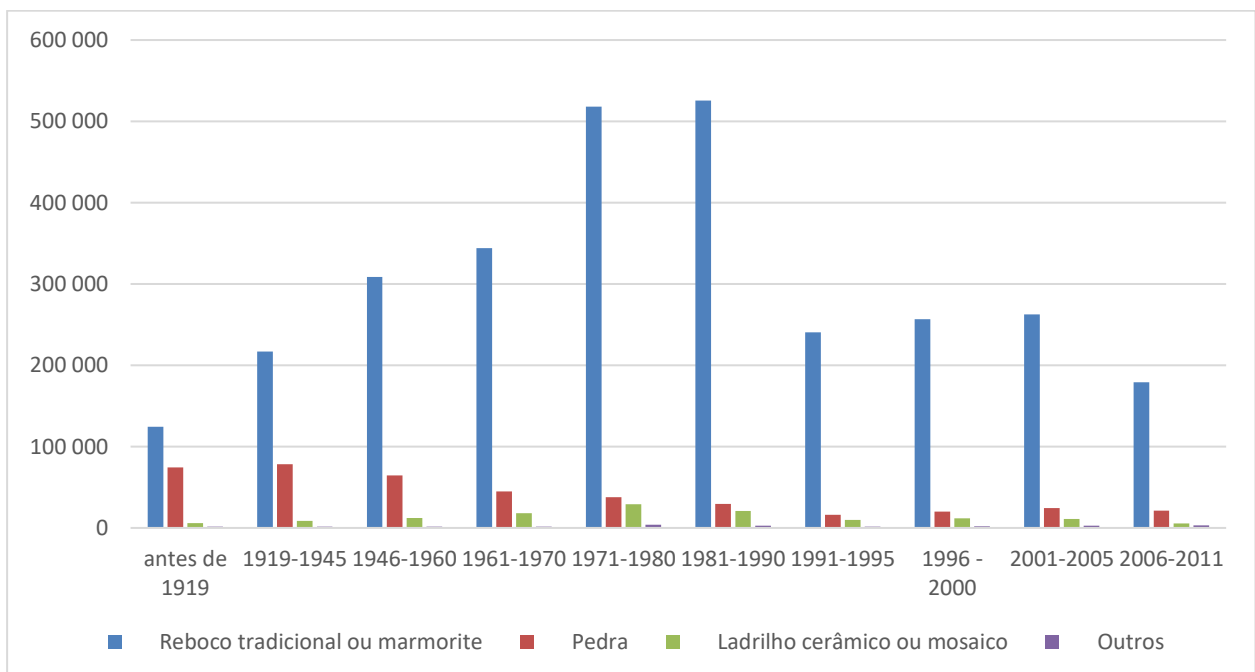


Figura 8 - Principais materiais utilizados na construção: Revestimento exterior por década [35]

Na Figura 8 identificam-se os principais materiais utilizados na construção, por década, para o revestimento exterior.

A partir da análise dos dados da Figura 8, é possível verificar que o revestimento exterior é realizado quase unicamente com reboco tradicional ou marmorite, independentemente da época de construção.

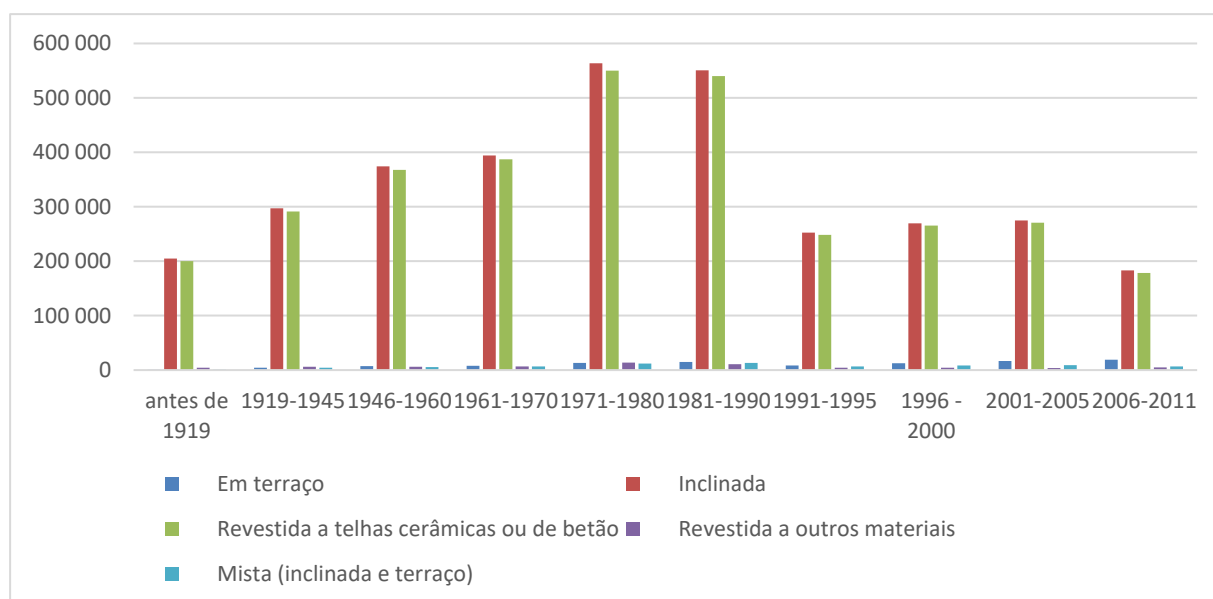


Figura 9 - Principais materiais utilizados na construção: Cobertura por década [35]

O material utilizado na cobertura tem um papel muito importante no conforto térmico. Durante o Inverno, o material deve evitar as perdas de calor por ascensão do ar quente no interior. Durante o Verão deve ser capaz de isolar o interior da temperatura provocada pela exposição solar.

No que diz respeito à cobertura dos edifícios, os principais materiais utilizados, por década, estão apresentados na Figura 9. Da análise desta figura é possível constatar que, de uma forma uniforme, o material mais utilizado é o revestimento a telhas cerâmicas ou de betão, instalados em cobertura inclinada.

### 3.2. Caracterização dos consumos

De acordo com dados da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), em 2016, o setor residencial foi responsável pelo consumo de 2694 ktep[40]. Na Figura 10 indica-se a proveniência desta energia em valor percentual. Como se pode constatar a partir desta figura, a eletricidade é a fonte mais utilizada no setor residencial.

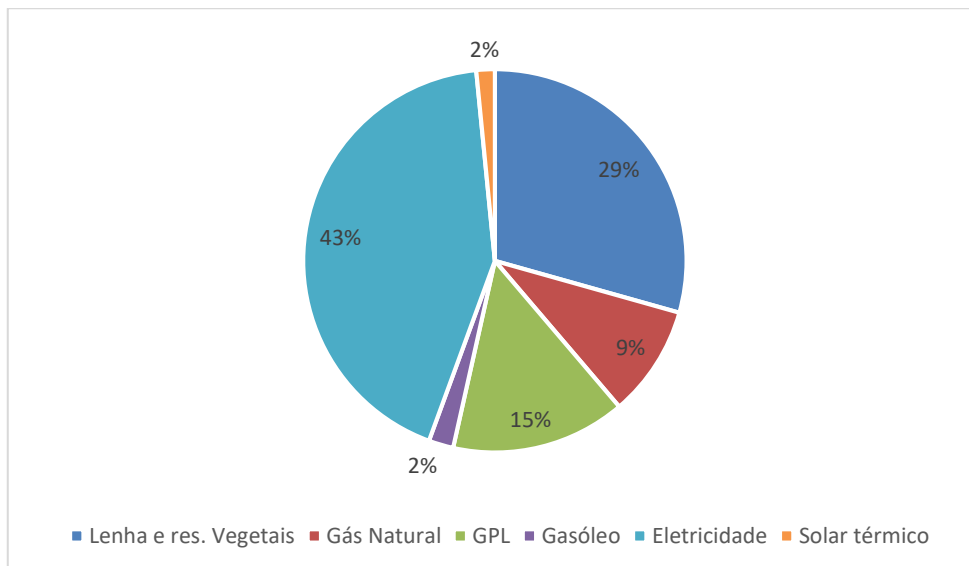


Figura 10 - Consumo do setor residencial por fonte de energia [40]

Quando se trata do uso final da energia, a maior procura regista-se na cozinha, com um consumo de 39%, devido ao elevado número de equipamentos e horas de utilização. Em segundo lugar, encontram-se o aquecimento de água, com 23%, destaca-se ainda o aquecimento ambiente com 22% do consumo [41].

A Figura 11 indica o número de alojamentos por tipo de aquecimento e por fonte de energia utilizada. O tipo de aquecimento com maior peso são os aparelhos móveis, tipicamente os pequenos aquecedores elétricos. Realizando uma análise do ponto de vista das fontes mais utilizadas, a eletricidade ocupa cerca de 53% da energia utilizada no aquecimento, de seguida encontram-se os combustíveis sólidos (madeira, carvão), representando 34% da energia. A restante fatia é ocupada pelo gás natural e outros combustíveis gasosos, 9%, pelo gasóleo e outros combustíveis líquidos, 4%, e por último as energias renováveis que representam menos de 1% da energia utilizada no aquecimento.

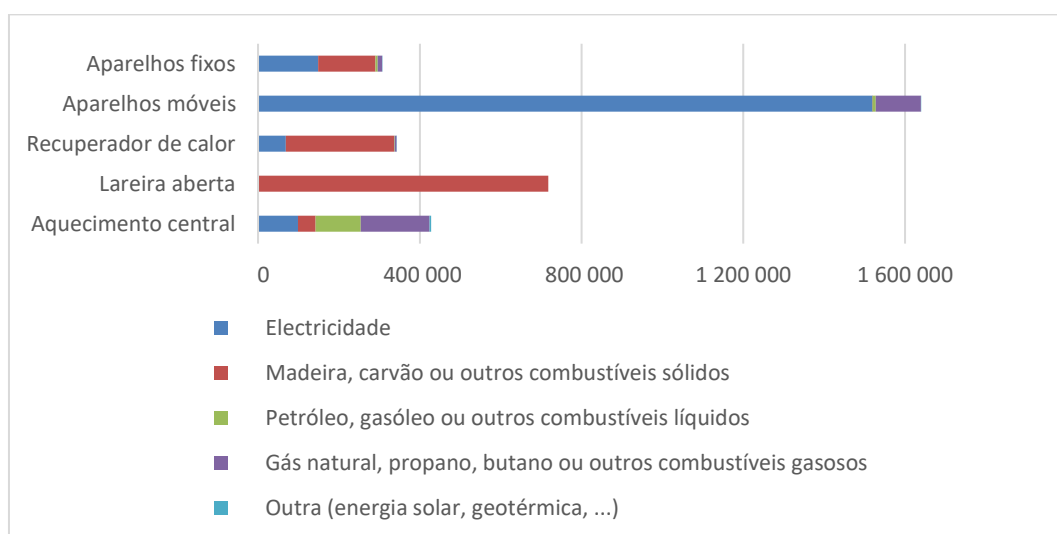


Figura 11 - Número de alojamentos por tipo de aquecimento e por fonte de energia [35]

## 4. Metodologia de avaliação

Neste capítulo apresentam-se as diferentes etapas do desenvolvimento de uma metodologia com base em Análise Multicritério para a avaliação de diferentes medidas de reabilitação energética de edifícios residenciais, que possa apoiar os decisores políticos na seleção das medidas com maior potencial de implementação e que poderão ser alvo de apoio e/ou financiamento público.

### 4.1. Metodologias multicritério de apoio à decisão (MCDA)

A análise multicritério é uma forma de avaliar e apoiar um processo de decisão. As metodologias multicritério de apoio à decisão (MCDA) são particularmente apropriadas para problemas complexos, com um elevado grau de incerteza e envolvendo critérios que podem não ser facilmente quantificáveis.

Tipicamente, os critérios utilizados neste tipo de análise entram em conflito entre si. Um exemplo disso é a utilização de critérios como o preço e a qualidade, que estão normalmente em conflito. A título de exemplo, quando um consumidor procura comprar um automóvel, este analisa vários critérios, como o custo, o conforto, a segurança e o consumo. Neste cenário, o mais habitual será que o automóvel mais barato não será o mais seguro ou o mais confortável. Embora este exemplo não seja um problema complexo, a necessidade de estruturar problemas e de quantificar os vários critérios torna-se evidente na tomada de decisões.

A Figura 12 descreve o processo desde a formulação de alternativas e seleção de critérios até à decisão [42].

Quando aplicado no setor energético, este tipo de método tem a capacidade de auxiliar a tomada de decisão em problemas de gestão energética complexos. As preocupações ambientais levam a que as abordagens mais clássicas orientadas para identificar as opções mais eficientes a um preço mais baixo caiam em desuso.

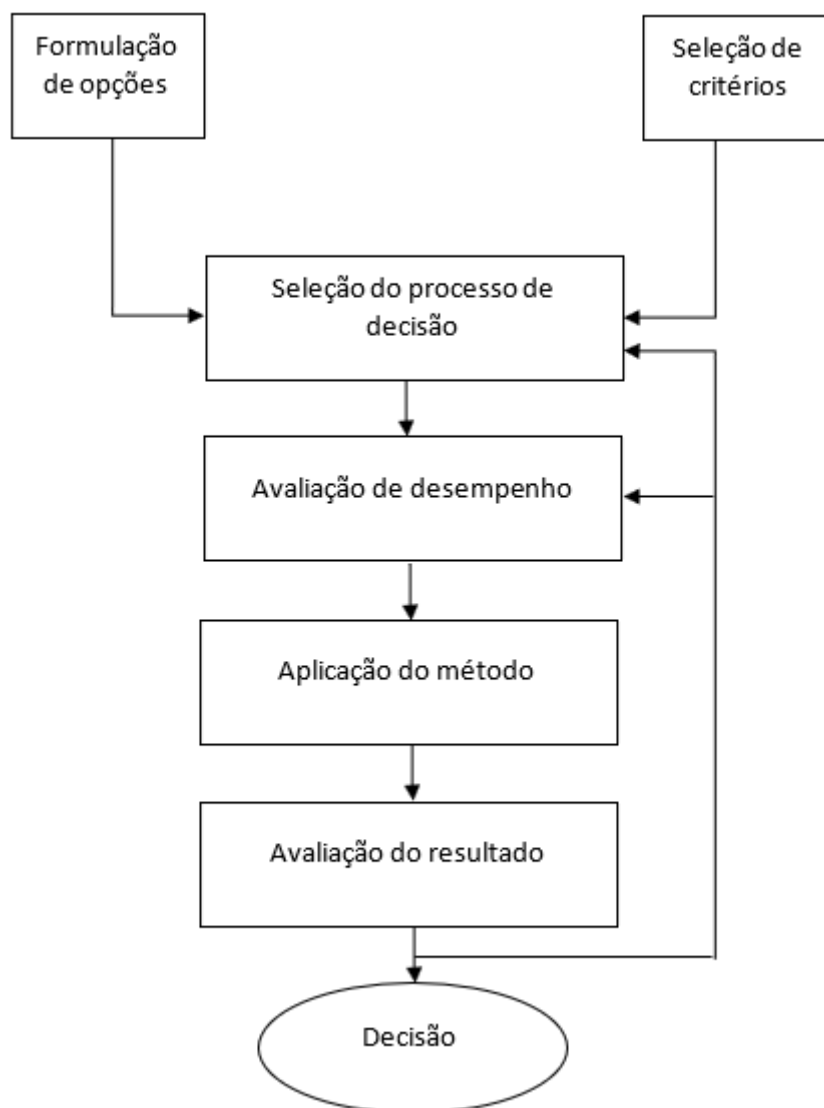


Figura 12 - O processo de decisão multicritério [42]

## 4.2. Seleção de medidas de eficiência energética

O conjunto de medidas selecionado envolve a substituição de tecnologias já existentes ou a aplicação de novas tecnologias/materiais durante o processo de intervenção levado a cabo num edifício. O conjunto de medidas selecionado teve em consideração duas tipologias diferentes de edifícios residenciais (unifamiliares – moradias com quatro fachadas e cobertura; e multifamiliares - apartamentos com duas fachadas), diferentes épocas de construção (tendo em consideração o ano dos primeiros registos existentes – 1946, o ano em que surge a primeira legislação nacional referente às características térmicas dos edifícios construídos -1990 e ainda as necessidade de reparação dos edifícios por época de construção apresentadas no capítulo 3).

A seleção das medidas teve em consideração não só a informação obtida na pesquisa bibliográfica referente à aplicação das diferentes metodologias de avaliação de medidas de

eficiência energética em edifícios residenciais (apresentada no capítulo 2), mas também informação recolhida junto de vários peritos durante a realização de uma oficina de trabalho no âmbito do projeto T4-ENERTEC - *Tools for supporting the selection of energy efficient technologies* (Ferramentas de apoio à seleção de tecnologias energeticamente eficientes) -POCI-01-0145-FEDER-029820, que teve lugar em 28 Novembro 2018. As medidas selecionadas podem ser agrupadas em duas categorias: tecnologias eficientes de utilização final (substituição de tecnologias de iluminação, de climatização e de produção de água quente sanitária) tecnologias de renovação de edifícios existentes (melhoria do isolamento das fachadas opacas e coberturas e substituição de janelas). A descrição das diferentes medidas consideradas encontra-se na Tabela 4, onde a coluna da direita representa a numeração das medidas de 1 a 15.

Tratando-se de medidas que se pretende venham a incrementar o desempenho energético de edifícios, a avaliação vai requerer a quantificação do impacto dessas medidas no consumo de energia, nomeadamente naquelas que direta ou indiretamente estão relacionadas com a climatização do edifício. Assim, para efeitos de cálculo foi considerada a zona climática onde se inclui a cidade de Coimbra.

*Tabela 4 - Descrição das diferentes medidas consideradas.*

	Substituição de caldeira a GPL por bomba de calor de 5kW	1
	Substituição de termoacumulador elétrico (2kW) por painel solar térmico (1.375kW)	2
	Substituição de lâmpadas fluorescentes compactas (62W) por LED (23.2W)	3
4 fachadas, anterior a 1946	Isolamento térmico de paredes com aplicação de poliestireno estruído de 35mm	4
	Substituição de janela de vidro simples por vidro duplo com caixilharia de PVC	5
	Isolamento externo de paredes utilizando EPS de 110mm	6
	Isolamento térmico de cobertura com aplicação de poliestireno estruído de 35mm	7
2 fachadas, anterior a 1946	Isolamento térmico de paredes com aplicação de poliestireno estruído de 35mm	8
	Isolamento externo de paredes utilizando EPS de 110mm	9
4 fachadas, 1946 a 1990	Isolamento térmico de paredes com aplicação de poliestireno estruído de 35mm	10
	Substituição de janela de vidro simples por vidro duplo com caixilharia de PVC	11
	Isolamento externo de paredes utilizando EPS de 110mm	12
	Isolamento térmico de cobertura com aplicação de poliestireno estruído de 35mm	13

2 fachadas, 1946 a 1990	Isolamento térmico de paredes com aplicação de poliestireno estruído de 35mm	14
	Isolamento externo de paredes utilizando EPS de 110mm	15

### 4.3. Critérios de avaliação

À semelhança do procedimento seguido na seleção das medidas a avaliar, também a seleção dos critérios de avaliação teve em consideração as fontes de informação anteriormente referidas (recolha bibliográfica e opinião de vários especialistas), podendo, deste modo, incluir no processo de avaliação os valores de algumas partes interessadas, proporcionando um ambiente de tomada de decisão participativo. Para a metodologia desenvolvida foram considerados relevantes/necessários cinco critérios de avaliação.

Dois dos critérios – o critério económico “Investimento inicial” e o critério tecnológico “Redução de consumos de energia” têm sido amplamente utilizados na aplicação de diferentes metodologias de avaliação.

O critério ambiental “Impactos durante o ciclo de vida (GWP)”, tem vindo a ser utilizado em trabalhos mais recentes de avaliação de medidas de reabilitação energética de edifícios residenciais. Contudo, são poucos os estudos que abrangem todas as etapas do ciclo de vida, centrando-se com mais frequência nas fases de manufatura dos equipamentos e do funcionamento do edifício [43].

Os dois critérios sociais “Capacidade de penetração no mercado na ausência de incentivos” e “Adequação para serem suportadas por políticas públicas de promoção da eficiência energética”, não têm sido usados nos processos de avaliação de medidas de reabilitação energética de edifícios residenciais. No entanto, a consideração destes critérios permitirá fazer refletir durante o processo de avaliação não só as preferências do consumidor, mas também as preferências do decisor no que respeita ao apoio e/ou financiamento público das medidas.

Na Tabela 5, são indicados os cinco critérios considerados e a respetiva escala de avaliação utilizada, o correspondente indicador e o sentido de preferência.



Tabela 5 - Critérios de avaliação considerados

<b>Critério</b>	<b>Escala</b>	<b>Indicador</b>	<b>Sentido de preferência</b>
Investimento inicial	Quantitativa	€	Minimização
Redução de consumos de energia	Quantitativa	kWh/ano	Maximização
Impactos durante o ciclo de vida (GWP)	Quantitativa	kgCO <sub>2</sub> eq	Minimização
Capacidade de penetração no mercado na ausência de incentivos	Qualitativa	Escala 1 - 5	Maximização
Adequação para serem suportadas por políticas públicas de promoção da eficiência energética	Qualitativa	Escala 1 - 5	Maximização

**Investimento inicial** - Critério económico, a minimizar, expresso em euros e que inclui os custos totais com a aquisição e instalação dos equipamentos.

**Redução de consumos de energia** – Critério tecnológico, a maximizar e que reflete a redução dos consumos de energia devido à utilização de equipamentos e tecnologias mais eficientes. As poupanças são expressas em kWh anuais. O sentido de preferência segue o sentido da maximização.

**Impactos durante o ciclo de vida (GWP)** – Critério ambiental, a minimizar. Este critério indica a quantidade de emissões de gases de efeito de estufa provocados por cada medida ou tecnologia durante o respetivo ciclo de vida. A unidade utilizada é o kgCO<sub>2</sub>eq.

**Capacidade de penetração no mercado na ausência de incentivos** – Critério social, a maximizar. Este critério refere-se à capacidade de adoção de uma tecnologia pelo consumidor num cenário de ausência de incentivos. Este critério é avaliado qualitativamente numa escala de 1 [muito fraca] a 5 [muito forte].

**Adequação para serem suportadas por políticas públicas de promoção da eficiência energética** – Critério social, a maximizar. Enquanto o critério anterior está orientado para o consumidor, este critério refere-se à perspetiva do decisor. Este critério é também avaliado qualitativamente na mesma escala usada para o critério anterior.

## 4.4. Processo de avaliação

De entre os vários métodos de avaliação multicritério existentes e cuja descrição sucinta se pode encontrar em [44], selecionou-se para o processo de avaliação o método ELECTRE TRI. A escolha deste método teve por base o facto permitir incluir critérios expressos em unidades diferentes, incluindo critérios qualitativos. Por outro lado, pretende-se que a avaliação das medidas seleccionadas seja feita de modo a serem afetadas a classes de preferência predefinidas pelo decisor, tendo em consideração o mérito absoluto das medidas e não o resultado da comparação entre as medidas, o que permite ao longo do processo de decisão a avaliação de novas medidas. Acresce que, sendo a classificação feita por comparação das medidas com perfis de referência definidos pelo decisor, os resultados obtidos refletem as preferências do decisor.

### 4.4.1. Método ELECTRE TRI

De acordo com [45] o método ELECTRE TRI permite classificar um conjunto  $A = \{a_1, \dots, a_m\}$  de  $m$  ações, avaliadas em  $n$  critérios  $G = \{g_1, \dots, g_n\}$ , segundo um conjunto  $C = \{C_1, \dots, C_t\}$  de  $t$  categorias predefinidas e ordenadas por ordem de preferência, sendo  $C_1$  a pior e  $C_t$  a melhor categoria, as categorias consecutivas são separadas por um conjunto de ações de referência  $B = \{b_0, \dots, b_t\}$

Cada categoria  $C_i$  ( $i=1, \dots, k$ ) é definida através de duas ações de referência (perfis de referência):  $b_i$  (categoria de limite superior) e  $b_{i-1}$  (categoria de limite inferior), definidas para cada critério.

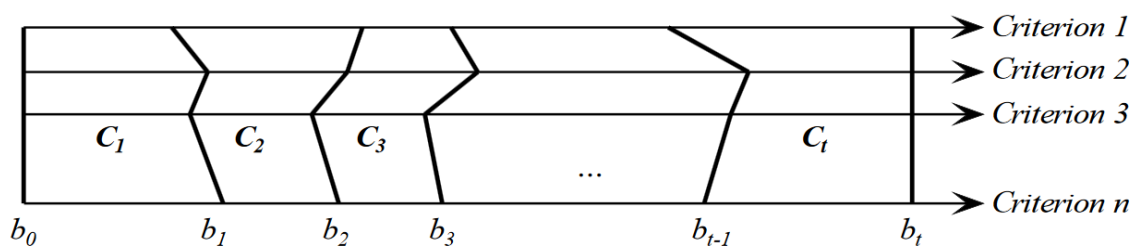


Figura 13 - Definição de categorias no ELECTRE TRI[45].

Quando existe uma relação de prevalência entre a ação  $a_i \in A$  e o perfil de referência  $b_h \in B$ , (utiliza-se a notação “ $a_i S b_h$ ”) pode-se considerar que  $a_i$  é pelo menos tão bom como  $b_h$ ). A relação de prevalência de  $a_i$  face a  $b_h$  é definida pelo número e importância dos critérios em que  $a_i$  prevalece face a  $b_h$ .

Para cada critério é quantificado um nível de concordância entre critério e perfil de referência através do índice “ $a_i S b_h$ ”, a concordância varia entre zero e um e atinge o valor máximo

(1) quando  $a_i$  é melhor que  $b_h$ . A credibilidade da afirmação “ $a_i S b_h$ ” é dada pelo indicador  $s(a_i, b_h)$ . Para verificar se o nível de credibilidade é significativo é utilizado o nível de corte  $\lambda$ , estabelecido para efetuar a diferenciação entre a prevalência e a não prevalência:  $a_i$  prevalece face a  $b_h$  ( $a_i S b_h$ ) se e só se  $s(a_i, b_h) \geq \lambda$ .

A regra para atribuir uma ação  $a_i$  a uma categoria  $C$  segue a seguinte ordem [46]:

- Se  $a_i$  não prevalece em relação a  $b_1$  ( $s(a_i, b_1) < \lambda$ ), então  $a_i$  pertence a  $C_1$ ; caso contrário;
- Se  $a_i$  prevalece em relação a  $b_1$  mas não a  $b_2$ ,  $a_i$  pertence a  $C_2$ ; caso contrário;
- Se  $a_i$  não prevalece em relação a  $b_3$ , então  $a_i$  pertence a  $C_3$ ; etc.

#### 4.4.2. Aplicação computacional IRIS [46]

O *software* de apoio à decisão IRIS 2.0 (*Intereactive Robustness analysis and parameters Interface for multicriteria Sorting problems*) é uma ferramenta com a capacidade de atribuir um conjunto de ações, descritas pelo seu desempenho em vários critérios, a um conjunto de categorias predefinidas, utilizando o método ELECTRE TRI.

A área de trabalho do IRIS, que funciona em Microsoft Excel, é composta por diferentes páginas:

- A página *Actions*, representada no lado superior esquerdo da Figura 14, é onde são inseridas as medidas a classificar, bem como os respetivos desempenhos nos cinco critérios de avaliação;
- A página *Fixed Par* que permite editar os valores dos limites das categorias e os limiares usados na avaliação das ações.
- A página *Bounds*, representada na parte central da Figura 14, permite editar os limites inferiores e superiores para o peso de cada critério ( $k_j$ ) e para o limiar de corte ( $\lambda$ ).
- A página *Constraints* permite editar ou adicionar restrições. Na parte inferior da Figura 14 apresenta-se, a amarelo, a equação normalizada, fixa. A restrição “ad1” presente na figura estabelece a seguinte relação:  $-k_1 + 1k_2 \geq 0 \Leftrightarrow k_2 \geq k_1$ .
- A página *Results* encontra-se representada no lado superior direito da Figura 14. Para cada medida existem quatro células que correspondem às categorias previamente definidas. Os diferentes tipos de verde representam a gama de possíveis classificações para cada medida, sendo que o verde mais escuro indica a classificação recomendada pelo IRIS e a verde mais claro estão indicadas as categorias a que cada ação podia ser afetada sem violar nenhuma restrição. Por fim, as células a negro indicam que a medida não pode ser classificada nessa categoria.

Actions   Fixed Par.   Bounds   Constraints								Results   Infer. Prog.   Indices					
Action	ELow	EHigh	g1	g2	g3	g4	g5		C1	C2	C3	C4	
0	1	4	4232	5250	1725	2.92	3.92						
1	1	4	999	912.5	219.4	3.08	4.25						
2	1	4	19.99	84.972	3.93	4.75	3.33						
3	1	4	718.21	10261.09	324.97	2.42	4.42						
4	1	4	1602.72	1835.92	810.43	3.42	4.58						
5	1	4	5023.54	10261.09	944.05	2.42	4.42						
								lambda	k1	k2	k3	k4	k5
								0.59	0.09	0.32	0.09	0.09	0.41

Actions   Fixed Par.   Bounds   Constraints						
	lambda	k1	k2	k3	k4	k5
LB - Lower	0.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
UB - Upper	0.67	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49

Actions   Fixed Par.   Bounds   Constraints								
	lambda	k1	k2	k3	k4	k5	< , = , >	RHS
Norm	1	1	1	1	1	1	=	1
ad1		-1	1				>=	0

Figura 14 - Aplicação do software IRIS

## 4.5. Avaliação do desempenho das medidas

Os dados e os pressupostos usados para determinar o desempenho das medidas em cada um dos critérios foram obtidos a partir de diferentes referências bibliográficas e com base na opinião dos peritos presentes na oficina de trabalho no âmbito do projeto T4-ENERTEC, anteriormente referida. Nas tabelas 6 e 7 são apresentados os parâmetros usados na avaliação das medidas referentes à renovação de edifícios existentes.

Tabela 6 - Parâmetros usados na avaliação das medidas - renovação de edifícios [44]

Tipo de edifício	Área de cobertura m <sup>2</sup>	Área envidraçada m <sup>2</sup>	Área parede opaca m <sup>2</sup>
4 fachadas, anterior a 1946	56.25	8.48	96.90
2 fachadas, anterior a 1946	56.25	8.48	54.02
4 fachadas, entre 1946 e 1990	37.50	10.60	65.65
2 fachadas, entre 1946 e 1990	37.50	10.60	34.40

Tabela 7 - Impacto das medidas na redução de consumos de energia [44]

Medida	Redução (kWh/m <sup>2</sup> )
Isolamento térmico de coberturas	65
Isolamento da fachada opaca, anterior a 1946	156.3
Isolamento da fachada opaca, entre 1946 e 1990	28.7
Substituição de vidro simples por vidro duplo em janelas, anterior a 1946	30.5
Substituição de vidro simples por vidro duplo em janelas, entre 1946 e 1990	43.1
Substituição de caixilharia e vidro simples por vidro duplo em janelas, anterior a 1946	43.3
Substituição de caixilharia e vidro simples por vidro duplo em janelas, entre 1946 e 1990	50.5

Para os critérios qualitativos, como anteriormente referido, foi usada uma escala de de 1 a 5, de acordo com a opinião dos peritos. Na Tabela 8 está reproduzida a escala de avaliação dos critérios qualitativos.

Tabela 8 - Escalas de avaliação dos critérios qualitativos

Escala de avaliação	Descrição
1	Muito fraca
2	Fraca
3	Moderada
4	Forte
5	Muito forte

#### 4.5.1. Avaliação do ciclo de vida das medidas selecionadas

O indicador utilizado para quantificar o impacto durante o ciclo de vida foi o potencial de aquecimento global (GWP) cuja unidade é o kgCO<sub>2</sub>eq. Este indicador é utilizado como uma métrica para comparar, relativamente a outro gás, a capacidade que um gás com efeito de estufa tem para armazenar calor na atmosfera.

Pretendendo-se na avaliação abranger do ciclo de vida das medidas e não apenas a fase de funcionamento dos edifícios, mais frequentemente usada em trabalhos anteriores, serão usadas duas variantes da LCA: “*cradle-to-grave*” avaliação do ciclo de vida completo e “*cradle-to-gate*”, que contempla apenas as fases de extração de matéria-prima e produção.

Para a avaliação do ciclo de vida das medidas selecionadas foi usada a informação resultante de uma recolha dados na literatura existente. Pretendendo ilustrar a aplicação da metodologia num contexto português, e nem sempre existindo dados disponíveis para a realidade nacional, procurou-se que os dados recolhidos fossem referentes a estudos desenvolvidos em países com características próximas das de Portugal (localização geográfica e *mix* energético, por exemplo).

## Isolamento:

O conforto térmico é uma característica essencial de um edifício residencial. Uma forma de o atingir é a utilização de isolamento térmico. A aplicação de isolamento térmico a um edifício permite diminuir a transferência de calor entre o interior e o exterior, tendo ainda a possibilidade de reduzir a utilização de sistemas de aquecimento ou arrefecimento.

O uso de isolamento térmico apropriado proporciona um maior conforto térmico, menores custos de operação e diminui o tamanho dos equipamentos de HVAC necessários.

A propriedade principal de um isolamento é a sua condutividade térmica ( $\lambda$ ), esta propriedade está associada à capacidade de o material transferir calor. A sua unidade é o Watt por metro e Kelvin,  $W/(m.K)$ . Outra forma de avaliar o material é através do coeficiente de transferência térmica ( $U$ ), este coeficiente é utilizado para medir a transferência de calor através da área de um material. A unidade do coeficiente de transferência térmica é o Watt por metro quadrado e por Kelvin,  $W/(m^2.K)$ [39].

### Isolamento térmico de paredes com aplicação de poliestireno extrudado (XPS) de 35mm

O poliestireno extrudado (XPS) é um material comercializado em placas. Neste contexto é aplicado em paredes duplas com caixa de ar com o intuito de criar uma ponte térmica. A Figura 15 esquematiza o seu processo de produção. A matéria prima utilizada na sua produção é o petróleo.

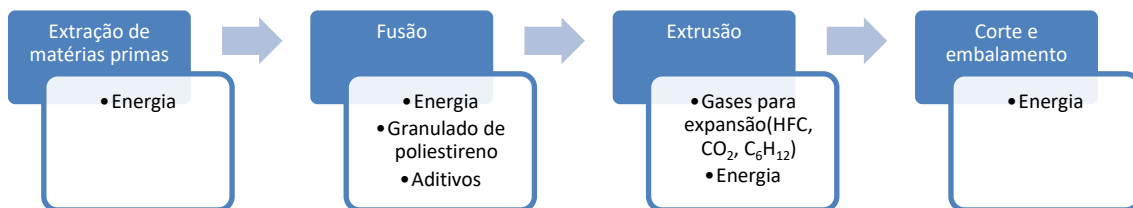


Figura 15 - Processo de produção do poliestireno extrudado[47].

Durante o ciclo de vida, o impacto ambiental do XPS é analisado principalmente durante a fase de produção. As análises são normalmente desde a extração da matéria prima até ao fabrico produto (“*cradle-to-gate*”). Durante o fim de vida, dependendo da forma como foi aplicado, este material tem o potencial para ser reutilizado. Caso não seja possível, o seu destino é o aterro sanitário.

Os dados utilizados são de uma análise “*cradle-to-gate*” [47], o autor baseou-se numa declaração ambiental [48]. Para uma placa de 1m<sup>2</sup> com um peso de 1.12kg e uma espessura de

35mm, o GWP é de 4.95kgCO<sub>2</sub>eq [47]. A produção deste material consome elevadas quantidades de eletricidade, pelo que a forma como esta foi gerada tem um impacto elevado no GWP, nesta análise foram utilizados valores médios do agregado de energias da UE.

O XPS tem uma condutividade térmica que depende da sua espessura, neste caso para 35mm é de 0.035 W/(m.K), tem uma densidade de 32 kg/m<sup>3</sup> [47] e um custo total de 10.47€ por m<sup>2</sup>, incluindo a mão de obra necessária para a instalação [49].

### **Substituição de janela de vidro simples por vidro duplo em caixilharia**

Neste âmbito, foi considerada caixilharia de PVC (policloreto de vinil), a produção deste plástico, comparativamente com a produção de outros materiais de caixilharia, por exemplo alumínio, tem um consumo energético bastante inferior, 70MJ/kg contra 225MJ/kg [50]. Embora apresente uma condutividade térmica inferior, a principal desvantagem deste material face ao alumínio é a dificuldade na reciclagem, no entanto, a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido para produzir a caixilharia de PVC é cerca de metade da necessária para produzir a caixilharia de alumínio [51].

A análise do ciclo de vida tem como base o estudo de [51]. O autor considera como unidade funcional uma janela com uma área de 2.15m<sup>2</sup>, a análise é feita para diferentes materiais de caixilharia e são consideradas várias opções de gases para o preenchimento do espaço entre as camadas de vidro.

Numa análise “*cradle-to-grave*”, o autor obteve um valor de emissões de 205kgCO<sub>2</sub>eq [51] por cada janela produzida. Foi considerada uma janela de vidro duplo com caixilharia em PVC e preenchida com argon, foi ainda considerada a utilização do *mix* de energias europeu. De forma a manter os dados homogêneos, entre medidas, foi considerado um valor de emissões por m<sup>2</sup>, através da divisão das emissões totais pela área da janela, obtendo-se assim um valor de 95.57 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

### **Isolamento externo de paredes utilizando poliestireno expandido (EPS) de 110mm**

O isolamento externo de paredes é uma forma viável e prática de melhorar a eficiência energética em edifícios mais antigos onde as paredes não possuem qualquer tipo de caixa de ar. Esta técnica é particularmente relevante quando aplicada numa fase de reabilitação do edifício, pois além de garantir um maior conforto térmico garante também um bom acabamento ao nível estético. Este tipo de soluções pode também ser aplicado no interior. Neste caso, o principal inconveniente é a redução do espaço interior do imóvel.

Este tipo de isolamento é constituído por várias camadas de material. O principal e mais volumoso é o material isolante, EPS, de seguida é aplicada uma camada de fibra de vidro, com o intuito de reforçar a estrutura do material isolante. Por fim, é aplicada uma camada de acabamento final da parede.

A forma de aplicação torna este material particularmente difícil de reciclar, as opções passam pela remoção e substituição de todo o material ou pela demolição do edifício. A dificuldade da separação dos materiais leva a que o EPS tenha como destino os aterros sanitários

De acordo com dados de [52], para uma área de  $1\text{m}^2$ , com uma espessura de 110mm é obtida uma condutividade térmica de  $0.038\text{W/mK}$ . Para estas dimensões o autor realizou uma análise “*cradle-to-gate*” para um período temporal de 100 anos, chegando assim a um valor de GWP de  $14.48\text{kgCO}_2\text{eq}$  [52].

### **Substituição de caldeira a GPL por bomba de calor**

A bomba de calor é um dispositivo que transfere calor de um local frio para um local mais quente. Este mecanismo funciona em oposição ao processo natural em que o calor tende a transferir-se para um local mais frio.

Uma bomba de calor utiliza energia externa, normalmente elétrica, para realizar o trabalho de transferir energia de uma fonte de calor para um dissipador de calor. Os principais componentes deste equipamento são o compressor, o condensador, a válvula de expansão e o evaporador. Por estes componentes circula um líquido refrigerante responsável pela transferência de calor.

Este equipamento tem uma eficiência superior aos equipamentos típicos que utilizam resistências elétricas para aquecimento, isto porque, a maioria da energia vem de ambiente externo onde a bomba se encontra, sendo que a utilização de eletricidade serve apenas para alimentar o compressor. Enquanto que no aquecimento por resistência elétrica toda a energia elétrica é convertida em calor, originando um coeficiente de performance (COP) de 1, na bomba de calor a transferência de calor é superior à energia elétrica consumida, logo o COP é superior a 1.

De acordo com o estudo de [53], numa análise “*cradle-to-grave*” utilizando os dados constantes da Tabela A.1 (Apêndice A), o autor chegou a um valor de  $0.276\text{kgCO}_2\text{eq/kWh}$ . De notar que este valor utiliza o *mix* de energias do Reino Unido composto por uma elevada percentagem de combustíveis fósseis, incluindo o carvão. Utilizando dados de [44] foi calculado o impacto para uma vida útil de 15 anos e utilização de 1250 horas anuais, obtendo-se assim um total de emissões de  $1725\text{kgCO}_2$ .



### **Substituição de termoacumulador elétrico (2kW) por painel solar térmico (1.375kW)**

Dadas as condições de Portugal em relação ao número de horas de exposição solar, comparativamente a outros países europeus, verifica-se que o país se encontra em situação privilegiada. Portugal possui um valor médio de radiação solar diária anual de  $4.72\text{kWh/m}^2$  [54], um dos mais elevados da União Europeia.

O painel considerado utiliza um sistema de circulação forçada recorrendo a uma bomba elétrica. Este sistema faz circular um fluido que é aquecido no painel e que posteriormente transfere o calor para a água num cilindro. O cilindro conta com uma resistência elétrica de apoio para aquecer água em alturas de baixa radiação solar.

De acordo com a análise feita em [55] a produção do painel é responsável por cerca de 98% das emissões de  $\text{CO}_2$ , o total de emissões durante o ciclo de vida é de  $219.4\text{kgCO}_2\text{eq}$  [55]. Esta análise foi realizada em Itália um país mediterrânico com um nível de exposição solar próximo do de Portugal. Na Tabela A.2 (Apêndice A) apresentam-se os dados que foram usados na análise de acordo com os materiais utilizados pelo sistema.

### **Substituição de lâmpadas fluorescentes compactas (CFL) (62W) por LED (23.2W)**

A utilização de iluminação LED tem-se massificado devido à sua elevada eficiência luminosa. Na análise em questão a lâmpada CFL tem uma eficiência de  $45.87\text{Lm/W}$ , enquanto que a lâmpada LED possui uma eficiência de  $83.47\text{Lm/W}$ .

A análise do ciclo de vida é baseada no estudo de [56]. Trata-se de uma análise “*cradle-to-grave*” e é utilizada a unidade funcional, 1 lux por 50000 horas. A unidade lux está relacionada com a intensidade de luz para uma dada área, 1 lux equivale a  $1\text{Lumen/m}^2$ .

Os materiais bem como a energia utilizada em todo o ciclo de vida encontram-se descritos na Tabela A.3 (Apêndice A), foi utilizado o *mix* de energias da União Europeia. O total de emissões de  $\text{CO}_2$  obtido foi de  $3.93\text{kgCO}_2\text{eq/lux}$  [56] para uma vida de 50000 horas. De acordo com o autor, uma percentagem entre 96 a 99% corresponde à fase de utilização, podendo concluir-se que o *mix* de energia utilizado é responsável pela maioria das emissões de  $\text{CO}_2$ .



## 5. Aplicação da metodologia

A aplicação da metodologia desenvolvida para a avaliação das medidas de eficiência energética no setor residencial é descrita neste capítulo, juntamente com a análise dos principais resultados obtidos. Como referido, a aplicação da metodologia será feita com o método ELECTRE TRI, através do *software* IRIS.

Uma vez que foram considerados relevantes/necessários cinco critérios de avaliação, a aplicação da metodologia é possível com recurso à versão *Demo* do *software* IRIS, disponível gratuitamente *online* (IRIS 2.0).

### 5.1. Desempenhos das medidas selecionadas

Na Tabela 9 apresentam-se os desempenhos, em cada um dos cinco critérios de avaliação considerados, das medidas selecionadas e descritas na Tabela 4. O desempenho de cada medida face a cada um dos critérios foi obtido tendo por base a informação e os dados/pressupostos referidos no capítulo anterior relativos à avaliação do desempenho das medidas

Tabela 9 - – Desempenhos das medidas selecionadas.

	Investimento inicial, €	Redução de consumos de energia kWh/ano	Impactos durante o ciclo de vida (GWP) kgCO <sub>2</sub> eq	Capacidade de penetração no mercado na ausência de incentivos, (1 a 5)	Adequação para serem suportadas por políticas públicas de promoção da eficiência energética, (1 a 5)
1	4232.00	5250.00	1725.00	2.92	3.92
2	999.00	912.50	219.40	3.08	4.25
3	19.99	84.97	3.93	4.75	3.33
4	1060.086	15145.47	479.66	2.42	4.42
5	1602.72	367.18	810.43	3.42	4.58
6	7414.79	15145.47	1393.42	2.42	4.42
7	615.38	3656.25	278.44	2.00	4.43
8	590.98	8443.33	267.39	2.42	4.42
9	4133.61	8443.33	776.81	2.42	4.42
10	718.21	1884.16	324.97	2.42	4.42
11	2003.40	535.30	1013.04	3.42	4.58
12	5023.54	1884.16	944.05	2.42	4.42
13	410.25	2437.50	185.63	2.00	4.43
14	376.34	987.28	170.28	2.42	4.42
15	2632.29	987.28	494.67	2.42	4.42

## 5.2. Perfis e limiares usados no *software* IRIS

Uma vez que a aplicação do método ELECTRE TRI irá classificar as medidas segundo categorias ordenadas predefinidas, sendo cada categoria definida através de duas ações de referência (ver descrição do método ELECTRE TRI no ponto 4.4.1 do capítulo anterior), torna-se necessário definir estes perfis de referência.

A classificação das medidas consideradas neste estudo será realizada considerando o seu potencial de implementação: baixo ( $C_1$ ), médio ( $C_2$ ), elevado ( $C_3$ ) e muito elevado ( $C_4$ ). Considerando-se quatro categorias de classificação, será necessário definir três perfis de referência (b1, b2 e b3). A definição das categorias e dos perfis de referência teve em consideração a opinião dos peritos referidos anteriormente.

É ainda necessária a definição dos limiares de indiferença (q) e de preferência (p). Na aplicação da metodologia, para cada critério, os limiares de indiferença (q) e de preferência (p) fixaram-se respetivamente em 1% e 10% das gamas de variação dos desempenhos para cada categoria a que dizem respeito, de acordo com [44].

Os perfis e limiares usados no *software* IRIS são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Perfis e limiares usados no *software* IRIS.

Perfis e limiares	Investimento inicial, €, (k1)	Redução de consumo de energia kWh/ano, (k2)	Impactos durante o ciclo de vida (GWP) kgCO <sub>2</sub> eq, (k3)	Capacidade de penetração no mercado na ausência de incentivos, (1 a 4), (k4)	Adequação para serem suportadas por políticas públicas de promoção da eficiência energética, (1 a 4), (k5)
b1	5000	1000	1200	1.9	3.95
q1	30	40	6	0.0045	0.0025
p1	300	400	60	0.045	0.025
b2	2000	5000	600	2.35	4.2
q2	12.5	50	3.5	0.0165	0.003
p2	125	500	35	0.165	0.03
b3	750	10000	250	4	4.5
q3	7.5	100	2.5	0.04	0.045
p3	75	1000	25	0.4	0.45

## 5.3. Análise de alguns resultados

De acordo com a sugestão de [46], na primeira iteração do modelo utilizam se intervalos amplos para todos os parâmetros e não se considera nenhuma restrição adicional. Foi considerado

um limar de corte  $\lambda \in [0,51;0,67]$ , correspondendo a uma variação de maioria simples a maioria qualificada de 2/3 [44]. Para garantir que todos os critérios são considerados e que o peso máximo de cada critério será sempre inferior à soma dos pesos dos restantes critérios, considerou-se que cada peso  $k_j \in [0.01;0.49]$ .

Os resultados obtidos nesta iteração inicial são apresentados na Figura 16.

	C1	C2	C3	C4	
BCalor					
Solar					
Led					
XPS.A46.4F					
VD.A46.4F					
EPS.A46.4F					
Cobert.A46					
XPS.46a90.4F					
VD.46a90.4F					
EPS.46a90.4F					
Cobert.46a90					
XPS.A46.2F					
EPS.A46.2F					
XPS.46a90.2F					
EPS.46a90.2F					
lambda	k1	k2	k3	k4	k5
0.59	0.09	0.32	0.09	0.09	0.41

Figura 16 - Resultados da iteração inicial

Na primeira iteração, de acordo com a classificação proposta pelo IRIS, é visível que a maioria das medidas são classificadas na categoria  $C^3$  (potencial de implementação elevado). Apenas duas medidas, (bomba de calor e iluminação LED) são classificadas na pior categoria,  $C^1$ . Uma vez que esta classificação foi obtida com a atribuição de pesos mais elevados aos critérios  $k_2$  – “Redução de consumo de energia” e  $k_5$  – “Adequação para serem suportadas por políticas públicas de promoção da eficiência energética”, a classificação na pior categoria pode ser explicada pelo fraco desempenho da medida “bomba de calor” (medida 1) face ao critério  $k_5$  e pelo fraco desempenho da medida “iluminação LED” (medida 3) nos dois critérios  $k_2$  e  $k_5$  (como mostrado na Tabela 9).

Numa segunda iteração foi introduzida uma restrição, tornando a soma do peso dos critérios “investimento inicial” ( $k_1$ ) e “redução do consumo de energia” ( $k_2$ ) superior à soma do peso dos restantes critérios, favorecendo os critérios relacionados com o consumidor.

Foram obtidos os resultados indicados na Figura 17. Nesta situação, a maioria das medidas continuam a ser classificadas na categoria  $C^3$  (potencial de implementação elevado) e verifica-se que a medida relacionada com a “iluminação LED” passou para a melhor categoria. Devido ao seu

baixo investimento inicial, bem como às elevadas poupanças anuais, esta medida gera um retorno rápido de investimento para o consumidor (Tabela 9 – medida 3).

A medida de isolamento que recorre à utilização de EPS em edifícios de quatro fachadas construídos anteriormente a 1946 foi a única medida classificada na pior categoria. Observando o peso atribuído a k1, podemos concluir que tal ocorre devido a esta ser a medida com o investimento inicial mais elevado, apesar de ser uma das medidas que origina poupanças anuais de energia mais elevadas (Tabela 9 – medida 6).

	C1	C2	C3	C4	
BCalor					
Solar					
Led					
XPS.A46.4F					
VD.A46.4F					
EPS.A46.4F					
Cobert.A46					
XPS.46a90.4F					
VD.46a90.4F					
EPS.46a90.4F					
Cobert.46a90					
XPS.A46.2F					
EPS.A46.2F					
XPS.46a90.2F					
EPS.46a90.2F					
lambda	k1	k2	k3	k4	k5
0.57	0.43	0.33	0.07	0.07	0.1

Figura 17 - Resultados obtidos com a consideração das preferências do consumidor.

Na terceira iteração, cujos resultados se apresentam na Figura 18, as medidas foram avaliadas do ponto de vista do decisor. Para isso, é incluída uma restrição que impõe que a soma dos pesos dos critérios “Capacidade de penetração no mercado na ausência de incentivos” (k4) e “Adequação para serem suportadas por políticas públicas de promoção da eficiência energética” (k5) seja superior à soma dos restantes.

Nesta iteração apenas quatro medidas são classificadas em categorias inferiores à categoria C<sup>3</sup> (potencial de implementação elevado), existindo duas medidas classificadas na pior categoria, C<sup>1</sup>. A primeira, “substituição de caldeira a GPL por bomba de calor”, devido ao elevado investimento inicial, possui uma baixa capacidade de penetração no mercado na ausência de incentivos e no critério relativo às políticas públicas de promoção de EE a classificação desta medida, embora boa, é uma das mais baixas dentro das medidas seleccionadas (Tabela 9 – medida 1). A segunda medida com a classificação mais baixa, “substituição de CFL por LED”, devido ao seu baixo investimento inicial é a medida com a capacidade de penetração no mercado na ausência

de incentivos mais elevada. No entanto, devido à sua massificação entre os consumidores e baixo custo, não existe uma necessidade de suporte por políticas de promoção de EE, pelo que o seu desempenho neste critério é baixo (Tabela 9 – medida 3).

	C1	C2	C3	C4	
BCalor					
Solar					
Led					
XPS.A46.4F					
VD.A46.4F					
EPS.A46.4F					
Cobert.A46					
XPS.46a90.4F					
VD.46a90.4F					
EPS.46a90.4F					
Cobert.46a90					
XPS.A46.2F					
EPS.A46.2F					
XPS.46a90.2F					
EPS.46a90.2F					
lambda	k1	k2	k3	k4	k5
0.584	0.084	0.084	0.084	0.374	0.374

Figura 18 - Resultados obtidos com a consideração das preferências do decisor.

A quarta iteração, cujos resultados obtidos são indicados na Figura 19, valoriza a vertente ambiental. Para isso, foi atribuído um peso superior aos critérios “Redução de consumos de energia”, com impacto na redução de emissões poluentes e “Impactos durante o ciclo de vida”, face a todos os outros.

Analisando os resultados da quarta iteração, verifica-se que as medidas de isolamento que fazem uso de EPS são classificadas em categorias inferiores, quando comparadas com cenários semelhantes onde é utilizado o XPS. A justificação para este facto pode ser encontrada na comparação dos valores de desempenho das medidas de isolamento face ao critério “Impactos durante o ciclo de vida” (Tabela 9, comparando o GWP das medidas 4 e 6; das medidas 8 e 10; das medidas 12 e 13 e das medidas 14 e 15). A existência de impactos mais elevados durante o ciclo de vida de isolamento que faz uso de EPS face ao isolamento onde é utilizado XPS é referida no ponto 4.4.1 do capítulo anterior, na análise do ciclo de vida dos materiais.

A medida relacionada com a bomba de calor encontra-se na pior categoria. A elevada quantidade de carbono emitida durante o ciclo de vida desta medida é a responsável por esta classificação, uma vez que apresenta um mau desempenho face ao critério “Impactos durante o ciclo de vida” (Tabela 9 – medida 1)

	C1	C2	C3	C4	
BCalor					
Solar					
Led					
XPS.A46.4F					
VD.A46.4F					
EPS.A46.4F					
Covert.A46					
XPS.46a90.4F					
VD.46a90.4F					
EPS.46a90.4F					
Covert.46a90					
XPS.A46.2F					
EPS.A46.2F					
XPS.46a90.2F					
EPS.46a90.2F					
lambda	k1	k2	k3	k4	k5
0.56	0.06	0.35	0.44	0.06	0.09

Figura 19 - Resultados obtidos com a consideração ambiental.

Numa nova iteração, cujos resultados se apresentam na Figura 20, são utilizados os intervalos amplos da primeira iteração, ou seja, os pesos  $K_j \in [0.01;0.49]$ . A alteração realizada está relacionada com a medida de instalação do painel solar térmico. Esta medida, nas iterações anteriores e de acordo com a classificação proposta pelo IRIS, é sempre classificada na categoria  $C^3$  (potencial de implementação elevado). Nesta iteração é imposta a esta medida uma classificação máxima na categoria  $C^2$  (potencial de implementação médio), tirando partido da possibilidade que o IRIS oferece de introduzir exemplos de classificação, isto é, o utilizador seleciona limites máximos e/ou mínimos de classificação para as medidas.

Esta imposição prende-se com a informação presente no segundo ponto do artigo 29º do Decreto-Lei n.º 194/2015, onde é referido que a instalação de sistemas solares térmicos para AQS é obrigatória sempre que o edifício é sujeito a uma grande intervenção e existe exposição solar adequada.

Com a consideração deste exemplo de classificação, através da classificação máxima da medida referente á instalação do painel solar térmico, a classificação proposta pelo IRIS é obtida com a atribuição de maiores pesos aos critérios “Investimento inicial” e “Redução de consumos”,  $k_1$  e  $k_2$ , respetivamente. Neste cenário a maioria das medidas é classificada na categoria  $C^2$  (potencial de implementação médio), enquanto nas iterações anteriores a maioria das medidas aparecia classificada na categoria  $C^3$  (potencial de implementação elevado). A introdução do exemplo de classificação reduziu o número de categorias em que cada medida pode ser classificada. Como se pode observar a partir da Figura 20, está classificada em apenas uma



categoria e a variação das outras está francamente reduzida, não havendo nenhuma medida que possa ser classificada nas quatro categorias consideradas.

	C1	C2	C3	C4	
BCalor					
Solar					
Led					
XPS.A46.4F					
VD.A46.4F					
EPS.A46.4F					
Cobert.A46					
XPS.46a90.4F					
VD.46a90.4F					
EPS.46a90.4F					
Cobert.46a90					
XPS.A46.2F					
EPS.A46.2F					
XPS.46a90.2F					
EPS.46a90.2F					
lambda	k1	k2	k3	k4	k5
0.6167	0.3734	0.4367	0.0633	0.0633	0.0633

Figura 20 - Resultados obtidos com a consideração de um exemplo de classificação.

Numa última iteração, foram alterados os valores de GWP das medidas que utilizam XPS e EPS no isolamento, que se refletirá no desempenho destas medidas face ao critério “Impactos durante o ciclo de vida”. Para estas medidas, foram agora utilizados os valores de análise de ciclo de vida “*cradle-to-grave*”, em vez dos anteriormente usados, que tinham sido obtidos através da análise “*cradle-to-gate*”, como descrito no ponto 4.5.1 do capítulo anterior. Deste modo, é feita uma avaliação do ciclo de vida completo para todas as medidas selecionadas.

Para o EPS foram utilizados os dados constantes na Tabela A.4 (Apêndice A) do cenário referente ao tratamento térmico com aproveitamento energético no fim de vida do material. Obteve-se um valor de  $100.9\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$ , estimando-se um valor de GWP de  $17.66\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$ .

Para o XPS foram utilizados os dados constantes na Tabela A.5 (Apêndice A) do cenário referente ao tratamento térmico com aproveitamento energético no fim de vida do material, tendo-se obtido um valor de  $15.65\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$  para uma espessura de 100mm. Tendo em conta que a medida selecionada utiliza uma placa de 35mm, foi estimado um GWP de  $5.48\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$ .

Nesta iteração, cujos resultados se encontram na Figura 21, foram atribuídos pesos mais elevados aos critérios “Redução de consumos de energia” e “Impactos durante o ciclo de vida”, tal como na quarta iteração.

	C1	C2	C3	C4
BColor				
Solar				
Led				
XPS.A46.				
VD.A46.4				
EPS.A46.				
Cobert.A4				
XPS.46a9				
VD.46a90				
EPS.46a9				
Cobert.4E				
XPS.A46.				
EPS.A46.				
XPS.46a9				
EPS.46a9				

lambda	k1	k2	k3	k4	k5
0.54	0.04	0.37	0.46	0.04	0.09

Figura 21 - Resultados obtidos com a consideração ambiental e análise “cradle-to-grave”

Comparando os resultados obtidos nesta iteração com os resultados obtidos na quarta iteração (Figura 19), verifica-se que a única alteração ocorre na medida onde é utilizado EPS no isolamento em edifícios de duas fachadas construídos entre 1946 e 1990. Esta medida deixou de estar classificada na categoria C<sup>3</sup> (potencial de implementação elevado), passando para a categoria C<sup>2</sup> (potencial de implementação médio), consequência de um pior desempenho face ao critério “Impactos durante o ciclo de vida”.

Embora não se verifiquem mudanças significativas na classificação das medidas, nesta última iteração, o desempenho de todas as medidas face ao critério “Impactos durante o ciclo de vida” foi obtido uniformizando todas as análises de ciclo de vida para o tipo “cradle-to-grave”.

Se o decisor assim o desejar, por considerar não ter informação suficiente para aceitar como finais os resultados obtidos, pode prosseguir o processo iterativo incluindo nova informação ou revendo informação já incluída, como foi feito na última iteração. Poderá incluir novas restrições e exemplos de classificação, bem como novas medidas para avaliação.

## 6. Conclusões e trabalho futuro

### 6.1. Conclusão

O principal objetivo deste trabalho foi efetuar a avaliação de medidas de reabilitação energética direcionadas para o setor residencial, podendo servir de suporte aos decisores políticos na seleção das medidas com maior potencial de implementação neste setor e que poderão ser alvo de apoio e/ou financiamento público.

Para o cumprimento deste objetivo, foi desenvolvida uma metodologia com base em análise multicritério que permitiu o recurso a diversos aspetos de avaliação, a utilização de diferentes escalas (quantitativas e qualitativas) para os diferentes critérios de avaliação usados e a participação de especialistas/técnicos.

Foram selecionados critérios de avaliação que permitem uma análise do ponto de vista do consumidor, da entidade decisora e de um ponto de vista ambiental. Um dos critérios ambientais, referente à análise do ciclo de vida das medidas, facilita uma tomada de decisão ambientalmente consciente. Este critério, juntamente com dois critérios de dimensão social (“Capacidade de penetração no mercado na ausência de incentivos” e “Adequação para serem suportadas por políticas públicas de promoção da eficiência energética”, que permitem incluir durante o processo de avaliação não só as preferências do consumidor, mas também as preferências do decisor no que respeita ao apoio e/ou financiamento público das medidas), diferenciam a metodologia de avaliação proposta de outras mais clássicas, focadas essencialmente em critérios económicos.

Durante a fase inicial do trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica, que permitiu uma familiarização com diferentes metodologias de análise de medidas de eficiência energética e de apoio à decisão. Esta fase do trabalho permitiu compreender a importância e a adequação das metodologias multicritério na análise de problemas de decisão complexos onde são utilizados critérios de avaliação nem sempre facilmente quantificáveis e que podem ser conflituosos entre si.

Pretendendo vir a aplicar a metodologia de avaliação desenvolvida à realidade nacional, após o levantamento das metodologias de avaliação, foi realizada uma caracterização do edificado residencial português. Esta caracterização permitiu identificar quais as problemáticas mais relevantes, tais como a elevada necessidade de reabilitação, sobretudo em edifícios construídos anteriormente a 1990. Foi também possível avaliar quais os tipos de materiais utilizados por década de construção, uma informação essencial para a seleção das medidas que beneficiem o comportamento energético dos edifícios.

O desenvolvimento da metodologia de avaliação envolveu diferentes fases: seleção do conjunto das medidas a avaliar, dos critérios de avaliação, do método de avaliação multicritério e obtenção do desempenho das medidas em cada um dos critérios selecionados. Para a seleção das medidas a avaliar e dos critérios de avaliação a usar foi considerada a informação recolhida na revisão bibliográfica efetuada e a informação obtida junto de vários peritos/especialistas durante a realização de uma oficina de trabalho no âmbito do projeto T4-ENERTEC - *Tools for supporting the selection of energy efficient technologies* (Ferramentas de apoio à seleção de tecnologias energeticamente eficientes), que teve lugar em 28 Novembro 2018.

As quinze medidas selecionadas para avaliação podem ser agrupadas em duas categorias: tecnologias eficientes de utilização final - substituição de tecnologias de iluminação, de climatização e de produção de água quente sanitária - e tecnologias de renovação de edifícios existentes - melhoria do isolamento das fachadas opacas e coberturas e substituição de janelas. O conjunto de medidas selecionado teve em consideração duas tipologias diferentes de edifícios residenciais (unifamiliares e multifamiliares), duas épocas de construção diferentes e ainda as necessidades de reparação dos edifícios por época de construção.

A metodologia contempla cinco critérios de avaliação: um critério económico, um critério tecnológico, um critério ambiental e dois critérios políticos. Destes critérios, três são avaliados numa escala quantitativa e dois são avaliados numa escala qualitativa.

Para o processo de avaliação foi selecionado o método ELECTRE TRI, por permitir incluir critérios expressos em unidades diferentes e por possibilitar uma classificação das várias medidas em categorias ordenadas e definidas antecipadamente pelo decisor.

A aplicação da metodologia foi feita com recurso ao programa IRIS, que implementa uma metodologia baseada no ELECTRE TRI. Os resultados obtidos em várias iterações foram apresentados e analisados. Durante a aplicação da metodologia, foi possível obter a classificação das medidas sob diferentes perspetivas (consumidor, decisor ou ambiental), tirando partido das características do IRIS. O decisor tem a possibilidade de introduzir restrições aos pesos dos critérios e também exemplos de classificação. A utilização de critérios definidos em unidade/m<sup>2</sup>, como é o caso do critério relacionado com o ciclo de vida, facilita a introdução de medidas adicionais para avaliação.

## 6.2. Linhas de trabalho futuro

Como linha de trabalho futuro, seria interessante aplicar a metodologia em edifícios residenciais construídos após 1990 aos quais tenha sido atribuído uma baixa classificação

energética. Seria também relevante (com as devidas alterações nos critérios, mas mantendo o critério de ciclo de vida), aplicar a outros setores, como por exemplo o industrial.

Tendo em conta os planos da União Europeia de redução das emissões de gases de efeito de estufa em 80-95% comparativamente a 1990, no parque habitacional, ou seja, transformar os edifícios atuais em nZEB, seria apropriado direcionar a aplicação da metodologia para medidas a aplicar neste contexto.



## Referências bibliográficas

- [1] P. Europeu, “DIRECTIVA 2002/91/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios,” no. 11, pp. 65–71, 2003.
- [2] P. Europeu, P. Europeu, J. Oficial, J. Oficial, P. Europeu, and J. Oficial, “DIRECTIVA 2010/31/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação),” pp. 13–35, 2010.
- [3] J. Oficial *et al.*, “DIRETIVA 2012/27/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 25 de outubro de 2012 relativa à eficiência energética,” pp. 1–56, 2012.
- [4] T. e C. Ministério das Obras Públicas, “Decreto-Lei n.º 80/2006,” 2006. [Online]. Available: <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/80/2006/04/04/p/dre/pt/html>.
- [5] Ministério da Economia e do Emprego, “Decreto-Lei n.º 118/2013,” 2013. [Online]. Available: <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/118/2013/08/20/p/dre/pt/html>.
- [6] V. Amirhosein Jafari, “An optimization framework for building energy retrofits decision-making, *Building and Environment*, Vol. 115, pp 118-129.,” 2017.
- [7] V. Amirhosein Jafari, “Selection of optimization objectives for decision-making in building energy retrofits, *Building and Environment*, Vol. 130, pp 94-103.,” 2018.
- [8] S. V. Erik Laes, Inge Mayeres, Nele Renders, Pieter Valkering, “How do policies help to increase the uptake of carbon reduction measures in the EU residential sector? Evidence from recent studies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 94, pp 234-250.,” 2018.
- [9] B. S.-M. Alberto Vilches, Antonio Garcia-Martinez, “Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review, *Energy and Buildings*, Volume 135, 15 January 2017, Pages 286-301.,” 2017.
- [10] O. E. and T. O. Ricardo Ramírez-Villegas, “Life Cycle Assessment of Building Renovation Measures—Trade-off between Building Materials and Energy. *Energies* 2019, 12(3), 344,” 2019.
- [11] R. M. Luís Bragança, “Sustentabilidade de soluções construtivas. Atas do Congresso sobre Construção Sustentável. Porto, Portugal, 2006,” 2006.
- [12] “Portal da habitação - Construção Sustentável.” [Online]. Available: <https://www.portaldahabitacao.pt/pt/portal/habitacao/construcao/construcaosustentavel.html>. [Accessed: 03-May-2019].
- [13] LiderA, “Sistema de avaliação da sustentabilidade,” 2015. [Online]. Available:

<http://www.lidera.info>. [Accessed: 07-Jun-2019].

- [14] M. D. Pinheiro, “LiderA,” 2011.
- [15] S. Gomes, “Aplicação do SBTool Urban : Efeitos de medidas de melhoria de projeto na avaliação de sustentabilidade,” 2005.
- [16] BREGlobalLtd, “BREEAMInternationalNewConstruction2016.”
- [17] T. F. M. Carapeto, “Dissertação de Mestrado,” 2016.
- [18] D. H. Casbee-dh, “What is CASBEE.”
- [19] U.S. Green Building Council, “LEED v4 for HOMES DESIGN AND CONSTRUCTION.”
- [20] and J. N. O. Pombo, K. Allacker, B. Rivela, “‘Sustainability assessment of energy saving measures: a multi-criteria approach for residential buildings retrofitting—A case study of the Spanish housing stock’, *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 384-394, Mar. 2016.,” 2016.
- [21] S. T. M. Domenico Dirutigliano, Chiara Delmastro, “A multi-criteria application to select energy retrofit measures at the building and district scale. *Thermal Science and Engineering Progress*, Volume 6, June 2018, Pages 457-464.,” 2018.
- [22] R. C. Jesús Lizana, ÿngela Barrios-Padura, Marta Molina-Huelva, “Multi-criteria assessment for the effective decision management in residential energy retrofitting, *Energy and Buildings*, Volume 129, 1 October 2016, Pages 284-307,” 2016.
- [23] D. H. C. and C. H. A. C. O. Henriques, “‘A multi-objective input-output model to assess E4 impacts of building retrofitting measures to improve energy efficiency’, *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 21(3), pp. 483-494, July 2015.,” 2015.
- [24] L. J. Joan Carreras, CarlosPozo, DieterBoer, Gonzalo Guillén-Gosálbez, Jose A. Caballero, Rubén Ruiz-Femenia, “Modelling and optimization framework for the multi-objective design of buildings. *Computer Aided Chemical Engineering*, Volume 38, 2016, Pages 883-888.,” 2016.
- [25] A. G. P. Penna, A. Prada, F. Cappelletti, “Multi-objectives optimization of energy efficiency measures in existing buildings, *Energy and Buildings*, Volume 95, 15 May 2015, Pages 57-69,” 2015.
- [26] L. G. Yong He, Nuo Liao, Jiajing Bi, “Investment decision-making optimization of energy efficiency retrofit measures in multiple buildings under financing budgetary restraint, *Journal of Cleaner Production*, Volume 215, 1 April 2019, Pages 1078-1094,” 2019.
- [27] and S. M. K. Y. Yaşar, “‘The effects of window alternatives on energy efficiency and building economy in high-rise residential buildings in moderate to humid climates’, *Energy conversion and management*, vol. 64, pp. 170-181, Dec. 2012,” 2012.
- [28] C. S. Ermanno Lo Cascio, Zhenjun Ma, Davide Borelli, “Residential Building Retrofit through Numerical Simulation: A Case Study, *Energy Procedia*, Volume 111, March 2017,



- Pages 91-100,” 2017.
- [29] and C. E.-R. J. Terés-Zubiaga, A. Campos-Celador, I. González-Pino, “‘Energy and economic assessment of the envelope retrofitting in residential buildings in Northern Spain’, *Energy and Buildings*, vol. 86, pp. 194-202, Jan. 2015,” 2015.
- [30] P. F. i C. Joana Ortiz, Antoni Fonseca i Casas, Jaume Salom, Nuria Garrido Soriano, “Cost-effective analysis for selecting energy efficiency measures for refurbishment of residential buildings in Catalonia, *Energy and Buildings*, Volume 128, 15 September 2016, Pages 442-457,” 2016.
- [31] V. M. Iyyanki V. Muralikrishna, *Environmental Management*. 2017.
- [32] International Organization for Standardization, “ISO 14040:2006.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>.
- [33] T. H. R.O. Morawicki, *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. 2014.
- [34] *Estatísticas da Construção e Habitação 2017*. 2017.
- [35] I. P. Instituto Nacional de Estatística, *Censos 2011 Resultados Definitivos - Portugal*. 2007.
- [36] O. Ine, *Estatísticas da Construção e Habitação |2018*. .
- [37] J. B. Marques, “• A Directiva Europeia EPBD • Sistema de Certificação Energética,” pp. 1–7, 2011.
- [38] ADENE, “Estudo de mercado no âmbito das campanhas de sensibilização e de promoção da eficiência energética na Habitação Particular,” 2017.
- [39] D. João and A. Mateus, “Análise da influência da inércia térmica no desempenho energético dos edifícios de serviços.”
- [40] DGEG, “Direção Geral de Energia e Geologia.” [Online]. Available: <http://www.dgeg.gov.pt/>.
- [41] S. Pye and A. Dobbins, “Energy poverty and vulnerable consumers in the energy sector across the EU : analysis of policies and measures,” *Policy Report-INSIGHT\_E*, no. May, p. 91, 2015.
- [42] S. D. Ã. Pohekar and M. Ramachandran, “Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning — A review,” vol. 8, pp. 365–381, 2004.
- [43] B. S.-M. Alberto Vilches, Antonio Garcia-Martinez, “Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review, *Energy and Buildings*, Volume 135, 15 January 2017, Pages 286-301,” 2017.
- [44] D. Coelho, “Apoio à Decisão em Planeamento Energético Urbano Integrado,” 2012.
- [45] V. Mousseau, “An aggregation / disaggregation approach to obtain robust conclusions with ELECTRE TRI,” vol. 138, pp. 332–348, 2002.
- [46] L. Dias and V. Mousseau, “IRIS - Interactive Robustness analysis and parameters ’

- Inference for multicriteria Sorting problems ( Version 2 . 0 ) User Manual,” no. 1, 2003.
- [47] S. S. Saadatian, “Integrated life-cycle analysis of six insulation materials applied to a reference building in portugal,” 2014.
- [48] EXIBA - European Extruded Polystyrene Insulation Board and Association, “ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION,” 2019.
- [49] S. A. CYPE Ingenieros, “Gerador de preços para construção civil. Portugal.” [Online]. Available: <http://www.geradordeprecos.info/>. [Accessed: 20-Jun-2019].
- [50] K. Alexandros and K. Alexandros, “Life cycle analysis of transparent building elements Life cycle analysis of transparent building elements,” no. October, 2012.
- [51] R. Y. Teenou and E. Science, “Energy and CO 2 emissions associated with the production of Multi- glazed windows,” 2012.
- [52] D. D. Tingley, A. Hathway, and B. Davison, “An environmental impact comparison of external wall insulation types,” *Build. Environ.*, vol. 85, pp. 182–189, 2015.
- [53] B. Greening and A. Azapagic, “Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK,” *Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 205–217, 2012.
- [54] A. Naci, T. Muneer, and P. Clarke, “A review of installed solar photovoltaic and thermal collector capacities in relation to solar potential for the EU-15,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 849–856, 2020.
- [55] R. Battisti and A. Corrado, “Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage,” vol. 13, 2005.
- [56] P. Principi and R. Fioretti, “A comparative life cycle assessment of luminaires for general lighting for the office - Compact fluorescent (CFL) vs Light Emitting Diode (LED) - A case study,” *J. Clean. Prod.*, vol. 83, pp. 96–107, 2014.
- [57] EUMEPS – Expanded Polystyrene (EPS) Foam Insulation, “ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION,” pp. 1–8, 2014.

# Apêndice A

Tabela A. 1 – Dados usados na avaliação do ciclo de vida da medida referente à substituição de caldeira a GPL por bomba de calor [53].

Component, system or life cycle stage	Air-source heat pump
Evaporator and condenser	• Low-alloyed steel: 32 kg
Housing and compressor	• Reinforcing steel: 120 kg
Wiring, piping and expansion valve	• Copper: 35.2 kg
Pipework insulation	• Elastomere: 16 kg
Wiring insulation	• Polyvinylchloride: 1.6 kg
Lubricating oil	• Polyolester oil: 2.7 kg
Air fan	• Copper: 1.4 kg
	• HDPE: 0.5 kg
Refrigerant	• R-134a: 4.90 kg
	• Losses: 3% (manufacture) & 6% (operation, annually)
Assembly of pump units	• Medium-voltage electricity (European mix): 504 MJ
	• Natural gas: 1400 MJ
Under-floor heating system	• Sand: 4650 kg
	• Cement: 900 kg
	• Aluminium: 126 kg
	• LDPE: 101 kg
	• Polystyrene: 66 kg
Operation	• UK electricity: 0.357 kWh/kWh heat generated
Maintenance	• Refrigerant: 0.294 kg (annually)
Decommissioning	• Steel: 61.7% recycled; 38.3% landfilled
	• Aluminium: 90% recycled; 10% landfilled
	• Copper: 41% recycled; 59% landfilled
	• Refrigerant: 80% reused
	• Ethylene glycol: 100% to wastewater treatment
	• Plastics, sand, brass and cement landfilled: 100% landfilled

Tabela A. 2 – Dados usados na avaliação do ciclo de vida da medida referente à substituição de termoacumulador elétrico por painel solar térmico [55].

Mass balance of the collector		Main air emissions (in kg) contributing to GE indicator			
Component	Mass (kg)	Unit (kg)	Collector production	Distribution	Uncontrolled disposal
Copper tubes	20.4	CO <sub>2</sub>	198.9	3.5	0.4
Steel case	15	N <sub>2</sub> O	$2.8 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$9.3 \times 10^{-6}$
Polyurethane sheet for insulation	3	CH <sub>4</sub>	0.25	$4.5 \times 10^{-3}$	$4.5 \times 10^{-4}$
Polycarbonate transparent covering	0.08				

Tabela A. 3 – Dados usados na avaliação do ciclo de vida da medida referente à substituição de lâmpadas fluorescentes compactas por LED [56].

Components	Items	SimaPro material	Weight (kg)
Packaging	Card	Packaging, corrugated board, mixed fiber, single wall, at plant	0.605
Packaging	Bags	Polyethylene, LLDPE, granulate, at plant	0.021
Packaging	Manuals	Packaging, corrugated board, mixed fiber, single wall, at plant	0.022
Housing	Reflector	Polycarbonate, at plant	0.126
Housing	Housing	Aluminum, production mix, at plant	1.200
Fasteners	Fasteners, washers, springs	Steel, low-alloyed, at plant	0.080
Fasteners	Metal clips	Aluminum, production mix, at plant	0.003
Fasteners	Plastic clips	Polycarbonate, at plant	0.007
Fasteners	Plastic clips	Polypropylene, granulate, at plant	0.001
Light source	Thermal conductive tape	Silicone product, at plant	0.011
Light source	heat sink	Aluminum, production mix, at plant	0.213
Light source	LED cover	Polycarbonate, at plant	0.063
Light source	LED array	Light emitting diode, LED, at plant	0.06
Electrical connection	Wiring	wire drawing, copper/RER	0.033
Driver	circuit	Printed wiring board, at plant	0.184
Driver	Fastener	Steel, low-alloyed, at plant	0.002
Driver	Connector	Polycarbonate, at plant	0.0065
Driver	Housing	Polycarbonate, at plant	0.134
Transportation	Raw materials and components	Lorry transport, Euro 0,1,2,3,4 mix, 22 t total weight, 17.3 t max payload RER	847 km kg
Transportation	Distribution	Lorry transport, Euro 0,1,2,3,4 mix, 22 t total weight, 17.3 t max payload RER	1.100 km kg
Electricity for manufacturing		Electricity, production mix RER	1.7 kWh
Natural gas for manufacturing		Natural gas, combusted in industrial equipment	0.27 m <sup>3</sup>

Tabela A. 4 – Dados usados na avaliação do ciclo de vida “*cradle-to-grave*” das medidas que utilizam EPS no isolamento [57].

DESCRIPTION OF THE SYSTEM BOUNDARY (X = INCLUDED IN LCA; MND = MODULE NOT DECLARED)																	
PRODUCT STAGE			CONSTRUCTION PROCESS STAGE		USE STAGE								END OF LIFE STAGE				BENEFITS AND LOADS BEYOND THE SYSTEM BOUNDARIES
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport from the gate to the site	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	De-construction demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recycling-potential	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
X	X	X	X	X	MND	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	MND	X	X	X	X	
RESULTS OF THE LCA - ENVIRONMENTAL IMPACT: 1 m <sup>3</sup> EPS foam (with infra red absorbers, 20 kg/m <sup>3</sup> )																	
Parameter	Unit	A1-A3	A4	A5	C2	C3/1	C3/2	C4/1	C4/2	D/1	D/2						
GWP	[kg CO <sub>2</sub> -Eq]	64.98	1.19	0.89	0.21	0.00	14.51	67.43	0.00	-33.80	-47.78						

Tabela A. 5 – Dados usados na avaliação do ciclo de vida “*cradle-to-grave*” das medidas que utilizam XPS no isolamento [48].

DESCRIPTION OF THE SYSTEM BOUNDARY (X = INCLUDED IN LCA; MND = MODULE NOT DECLARED)																	
PRODUCT STAGE			CONSTRUCTION PROCESS STAGE		USE STAGE								END OF LIFE STAGE				BENEFITS AND LOADS BEYOND THE SYSTEM BOUNDARIES
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport from the gate to the site	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement <sup>(1)</sup>	Refurbishment <sup>(1)</sup>	Operational energy use	Operational water use	De-construction demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recycling-potential	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
X	X	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	X	MND	X	X	
RESULTS OF THE LCA - ENVIRONMENTAL IMPACT: 1 m <sup>2</sup> XPS board with thickness of 100 mm																	
Parameter	Unit	A1 - A3	A4	C2	C4/1	C4/2	D/1	D/2									
GWP	[kg CO <sub>2</sub> -Eq]	9.444	0.283	0.026	0.241	11.190	0.000	-5.292									