



Sérgio Fernando Tadeu

RENTABILIDADE DA REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

Tese de doutoramento em Engenharia Civil, ramo de Construções, orientada pelos
Professores Doutores António José Barreto Tadeu e Nuno Albino Vieira Simões e apresentada ao
Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Agosto de 2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Rentabilidade da reabilitação energética de edifícios

Tese de doutoramento em Engenharia Civil, ramo de Construções, orientada pelos Professores Doutores António José Barreto Tadeu e Nuno Albino Vieira Simões e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Autor

Sérgio Fernando Tadeu

Esta tese é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada.

Apoio institucional



Coimbra, Agosto de 2015

“Coragem é saber o que não temer.”

Platão

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos ao programa Ciência sem Fronteiras (CsF), uma iniciativa que é fruto de esforço conjunto dos Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação e da Educação, do Brasil. Por meio da atuação impecável do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), no seu papel de instituição de fomento, esta investigação científica pôde transcorrer com serenidade e apoio adequado.

À Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e, mais precisamente ao Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons) e seus colaboradores, pelo acolhimento, acesso a instalações, laboratórios e equipamentos de vanguarda, além do compartilhamento de conhecimento de valor inestimável, um suporte sem o qual este estudo não teria sido levado a efeito.

Aos meus Orientadores, Professores António Tadeu e Nuno Simões, profissionais abnegados e competentes, pelo empenho em orientar esta tese e por todo o apoio académico oferecido durante o processo criativo. Não raro, abdicaram de suas horas de lazer e convívio familiar para contribuir com nossos estudos, sempre submetidos a prazos exíguos. Desde o início, uniram forças e estiveram dispostos a debater ideias, com mente aberta para trilhar o caminho do consenso. Tenho certeza de que este contributo extrapola o âmbito deste trabalho e acena com grandes oportunidades de colaboração futura.

Aos Professores Fausto Freire, Raimundo Mendes da Silva, António Gomes Martins, Patrícia Pereira da Silva e Carlos Henggeler Antunes que deram seu valioso contributo em estudos e publicações. A troca de experiências que proporcionaram foi inspiradora.

À Arq.^a Carla Rodrigues, profissional qualificada e dedicada, que me acompanha em inúmeros trabalhos conjuntos desde o mestrado, graças à afinidade de ideias e ao alinhamento de posições, em busca da sustentabilidade na construção e na reabilitação de edifícios.

Ao Eng.^o Márcio Gonçalves, que no alvorecer da carreira já demonstra talento, profissionalismo, humildade e companheirismo que o colocam na senda de um futuro promissor. Sua colaboração foi relevante e determinante para realização dos trabalhos.

Ao Professor Rafael Alexandre, colega determinado que obrigou-me a resgatar conceitos já esquecidos da minha formação de base, em Ciência da Computação. A sua busca incansável da coerência lógica e da perfeição é motivadora.

Finalmente, à minha família, que soube compreender a minha ausência, apoiou-me incondicionalmente e ajudou-me a alcançar o meu objetivo, aliás como sempre!

A todos, meu muito obrigado!

RESUMO

O desenvolvimento sustentável implica o equilíbrio entre a exploração dos recursos naturais, de maneira a satisfazer atuais necessidades do ser humano, e a garantia de renovação destes recursos, preservando a capacidade de suprimento às gerações futuras. Todavia, é quase um consenso na comunidade científica de que as alterações climáticas vêm sendo causadas pela nossa sociedade e que a manutenção do cenário atual de uso de fontes esgotáveis de energia e de altos índices de emissões de gases com efeito estufa ocasionará um aumento das temperaturas globais.

A eficiência energética e o uso de fontes de energia renováveis têm potencial para mudar este cenário e irão revelar-se uma parte muito significativa na resolução deste problema. Comparando-se os custos e benefícios, demonstra-se claramente as vantagens de uma ação rápida e forte que consiga integrar o crescimento económico com o equilíbrio ambiental e com a equidade social. Esta ação deve concentrar esforços nos setores mais intensivos no uso de energia. A indústria da construção e o uso de edifícios têm grande impacto no consumo de energia, constituindo-se importantes fontes de emissões de dióxido de carbono.

Este trabalho de investigação evidencia o compromisso inequívoco da União Europeia (UE) com a sustentabilidade. Nele são apresentadas diretivas para a promoção do uso de fontes de energia renováveis e para a melhoria do desempenho energético dos edifícios, as quais demonstram uma ação coordenada de políticas e estratégias que têm impacto direto no setor da construção e no uso de edificações. Contudo, um dos aspetos essenciais que tem de ser considerado de forma mais contundente nestas estratégias é a baixa taxa de renovação do estoque. A participação dos edifícios novos é bastante reduzida, de 1 a 2% do parque edificado europeu. Logo, ainda que as grandes renovações consistam em intervenções complexas, devem ser privilegiados instrumentos para promover o cumprimento de critérios fundamentais de sustentabilidade nos edifícios existentes para que se possa alcançar os objetivos estabelecidos.

Entre os proprietários de edifícios, predomina o sentimento de que as grandes renovações de edifícios são uma oportunidade para tomar medidas rentáveis de melhoria do desempenho energético. No entanto, a sua consciencialização em relação aos benefícios da reabilitação energética de edifícios está principalmente relacionada com a expectativa de retorno mensurável do investimento em cada medida de eficiência energética. Na ausência de dados e orientações, as decisões tendem a ser adiadas ou tomadas no plano subjetivo. Assim, o setor da reabilitação de edifícios continua a sofrer com investimentos insuficientes. As políticas para promoção da reabilitação energética têm falhado no incentivo ao investimento e no convencimento do setor privado e dos proprietários de edifícios em geral.

Para além da escassez de recursos em todos os setores da economia, o capital que estaria disponível para investimento em reabilitação energética sofre a concorrência de outras opções com retorno mais tangível. Na falta de informações concretas, o investimento em reabilitação

energética só ocorre por imposição regulamentar. O Regulamento Delegado (UE) n.º 244/2012 especifica regras para comparação da rentabilidade de medidas de eficiência energética e do uso de fontes de energias renováveis em edifícios novos e existentes.

Subentende-se, portanto, uma preocupação da União Europeia em garantir que o investimento em medidas de eficiência energética seja rentável e que, ao mesmo tempo, os requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios não se afastem demasiadamente dos denominados níveis ótimos de rentabilidade. Ocorre que a metodologia apresentada neste regulamento é dirigida a autoridades nacionais e não a investidores, e os níveis ótimos de rentabilidade são somente calculados para desenvolver disposições regulamentares aplicáveis a nível nacional. O regulamento salvaguarda que os níveis ótimos de rentabilidade calculados não serão necessariamente os níveis ótimos para cada combinação edifício/investidor.

O presente trabalho concentra-se no estudo da rentabilidade dos investimentos em reabilitação energética de edifícios. Pretende-se obter uma visão abrangente acerca desta temática e identificar oportunidades de melhoria na metodologia determinada pela Comissão Europeia, para que se aplique também a investidores. Para este efeito, identificam-se os parâmetros mais importantes nos cálculos e a interação entre eles, propõe-se um método de seleção e critérios de avaliação de rentabilidade de medidas, além de ferramentas de otimização que podem auxiliar o trabalho dos vários intervenientes.

O método é aplicado ao caso de Portugal, sendo selecionados três casos de estudo contendo cenários para reabilitação energética de edifícios. Os casos de estudo contemplam o setor mais relevante de edifícios no contexto português (residencial), as épocas de construção com maior potencial de redução de consumo de energia e uma classe de edifícios com restrições arquitetónicas para implementação de medidas. Adicionalmente ao método proposto, é aplicada a metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) e são realizados cálculos pelo método da simulação dinâmica. São utilizados ainda dois métodos multicritério para obter-se uma pequena amostra da perceção de moradores em relação ao valor e à utilidade da reabilitação energética de edifícios. Os resultados apresentados são confrontados com os atuais requisitos mínimos de desempenho energético, aos quais os proprietários de edifícios estão sujeitos. Como conclusão, são apresentadas recomendações para a promoção da reabilitação energética de edifícios.

ABSTRACT

Sustainable development means striking a balance between exploiting natural resources to meet the current needs of human beings and ensuring the renewal of these resources so as to safeguard the ability to supply future generations. However, it is almost a consensus in the scientific community that climate change has been caused by our society and that if the current scenario of using depletable energy sources and emitting high levels of greenhouse gases continues it will cause an increase in global temperature.

Energy efficiency and the use of renewable energy sources have the potential to change this scenario and they will prove to be very significant in solving this problem. Comparing the costs and benefits clearly exposes the advantages of strong rapid action that can combine economic growth with environmental balance and social equity. This action should concentrate on the most intensive users of energy. The construction industry and the use of buildings have a major impact on energy consumption and have become important sources of carbon dioxide emissions.

This research demonstrates the clear commitment of the European Union (EU) to sustainability. Directives that promote the use of renewable energy sources and improve the energy performance of buildings are presented to demonstrate the coordinated action of policies and strategies that have a direct impact on the construction sector and the use of buildings. However, one of the fundamental aspects that must be considered more forcefully in these strategies is the low rate of stock turnover. The share of new buildings is very small, 1-2% of the European building stock. Thus, although major renovations consist of complex interventions, they should be powerful tools to promote compliance with the core criteria of sustainability in existing buildings so that we can achieve the established objectives.

A feeling prevails among building owners that the major renovation of a building offers an opportunity to take effective measures to enhance energy performance. However, their awareness of the benefits of energy retrofitting of buildings is mainly related to the measurable expected return on investment in each energy efficiency measure. In the absence of data and guidelines, decisions tend to be postponed or taken at a subjective level. Thus, the sector of building rehabilitation continues to suffer from insufficient investment. Policies to promote energy retrofit have failed to encourage investment and have not persuaded the private sector and building owners in general.

In addition to the scarcity of resources in all sectors of the economy, the capital that could be available for investment in energy rehabilitation faces competition from other options with a more tangible return. In the absence of solid information, investment in energy rehabilitation only occurs by regulatory imposition. Delegated Regulation (EU) No. 244/2012 specifies rules for comparing the profitability of energy efficiency measures and the use of renewable energy sources in new and existing buildings.

The European Union is therefore concerned to ensure that investment in energy efficiency measures should be profitable and, at the same time, that the minimum energy performance requirements for buildings does not differ too much from what are regarded as cost-optimal levels. In fact, the approach presented in this Regulation is addressed to national authorities rather than investors, and the optimum levels of profitability are only calculated to develop national regulation. The regulation underlines that the calculated cost-optimal levels does not necessarily secure the optimum levels of profitability for each building/investor combination.

This work examines the profitability of investments in the energy retrofit of buildings. It sets out to obtain a comprehensive view of this issue and identify opportunities for improving the methodology imposed by the European Commission so that it also applies to investors. For this purpose, the most important parameters in the calculations and the interaction between them are identified and a method to select and evaluate the criteria of profitability measures is proposed. Optimization tools that can assist the work of the various stakeholders are also suggested.

The method is applied to Portugal, with three case studies containing scenarios for the energy retrofit of buildings being selected. The case studies include residential buildings, which is the most important sector of buildings in the Portuguese context, construction ages with higher potential for energy consumption reduction and a class of buildings with architectural constraints for implementing measures. Life-cycle assessment (LCA) is applied in addition to the proposed method, and calculations are performed using dynamic simulation. Two multi-criteria decision-aid methods were also used to obtain a small sample of the preferences of residents regarding the value and benefits of the energy retrofit of buildings. The results are compared with the current minimum energy performance requirements with which building owners must comply. In conclusion, recommendations to promote the energy retrofit of buildings are put forward.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABELAS	xxi
ABREVIATURAS	xxv
SIMBOLOGIA	xxvii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e motivação	3
1.2 Objetivos.....	12
1.3 Estrutura da tese.....	15
CAPÍTULO 2 - MOTIVOS E ESTRATÉGIAS PARA REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS	17
2.1 Introdução.....	19
2.2 Edifícios e o uso de energia.....	26
2.3 Políticas para o setor de edifícios	30
2.4 Regulamentação e seus desdobramentos	34
2.4.1 Diretiva de Eficiência Energética (EED).....	35
2.4.2 Diretiva das Fontes de Energia Renováveis (RES)	42
2.4.3 Diretiva relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD)	46
2.4.4 Regulamento Delegado n.º 244	54
2.5 Estudos relevantes	62
2.6 Considerações gerais	77
CAPÍTULO 3 - MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA RENTABILIDADE DA REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS	81
3.1 Introdução.....	83
3.2 Análise Económica de Soluções (AES).....	86
3.2.1 Soluções para isolamento térmico	88
3.2.2 Soluções para envidraçados.....	89
3.2.3 Soluções para sistemas convencionais de climatização	90
3.3 Dimensionamento de Sistemas FER (dFER)	95
3.4 Simulação de Desempenho Energético (SDE)	100

3.5	Simulação de Rentabilidade de Medidas (SRM)	106
3.5.1	Custo global e o critério do Valor Atualizado Líquido (VAL).....	107
3.5.2	Opções reais e o critério do Retorno sobre o Investimento (ROI).....	111
3.6	Análise de Sensibilidade de Parâmetros (ASP)	113
3.7	Procedimento expedito para indicação de rentabilidade.....	115
3.7.1	Indicação de rentabilidade de sistemas	122
3.8	Sistema de Eficiência Energética em Edifícios ($\$/e^3$).....	132
3.9	Algoritmo Genético para Eficiência Energética em Edifícios (AGe ³)	138
3.10	Considerações gerais.....	141
CAPÍTULO 4 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS		145
4.1	Caso de estudo I – edifício virtual	149
4.1.1	Introdução	149
4.1.2	Descrição do edifício	150
4.1.3	Aplicação do método e discussão de resultados	152
4.1.4	Conclusões do caso de estudo I.....	182
4.2	Caso de estudo II – edifício real.....	185
4.2.1	Introdução	185
4.2.2	Descrição do edifício	186
4.2.3	Aplicação do método e discussão de resultados	190
4.2.4	Conclusões do caso de estudo II	210
4.3	Caso de estudo III – percepção em relação à reabilitação energética de edifícios ..	212
4.3.1	Introdução	212
4.3.2	Descrição do edifício e medidas de reabilitação	213
4.3.3	Metodologia para avaliação da percepção	215
4.3.4	Aplicação da metodologia e discussão de resultados.....	223
4.3.5	Conclusões do caso de estudo III.....	226
4.4	Considerações gerais.....	226
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS		229
5.1	Introdução	231
5.2	Recomendações para a promoção da reabilitação energética de edifícios.....	234
5.3	Conclusões finais	238
5.4	Perspetiva de trabalhos futuros	238
REFERÊNCIAS.....		241
Anexo I – Quadro dos edifícios existentes em estudo - dimensões e características gerais		I
Anexo II – Quadro dos edifícios existentes – desempenho		III

Anexo III – Quadro dos edifícios de existentes - requisitos aplicáveis.....	XVII
Anexo IV – Quadro exemplo de medidas de eficiência - necessidades de energia.....	XIX
Anexo V – Quadro exemplo de medidas de eficiência – custo global e ROI	XXI
Anexo VI – Quadro dos custos de energia	XXIII

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribuição da área útil edificada, na União Europeia (fonte: BPIE [8]).	4
Figura 1.2. Distribuição da área útil edificada por categorias de edifícios, na União Europeia (fonte: BPIE [8]).	5
Figura 1.3. Distribuição do parque residencial por época de construção, até 2010 e na União Europeia (fonte: BPIE [8]).	5
Figura 1.4. Repartição do consumo total de energia por setor de atividade, em Portugal (fonte: ICESD [17]).	8
Figura 1.5. Evolução do consumo de energia em [tep] nos alojamentos em 1989, 1996 e 2010, por tipo de fonte de energia, em Portugal (fonte: ICESD [17]).	9
Figura 1.6. Tipos de uso de energia nas habitações, em Portugal: a) consumo por tipo de uso [%]; b) despesa por tipo de uso [%] (fonte: ICESD [17]).	9
Figura 1.7. Uso de energia proveniente de fontes renováveis nas habitações, em Portugal: a) consumo de FER [%]; b) despesa com FER [%] (fonte: ICESD [17]).	10
Figura 1.8. Edifícios segundo a época de construção, em Portugal (fonte: ICESD [17]).	10
Figura 1.9. Consumo médio para aquecimento de habitações unifamiliares por ano de construção, em [kWh/(m ² .ano)] (fonte: BPIE [8]).	11
Figura 2.1. Os três pilares do desenvolvimento sustentável (fonte: Brundtland [1]).	19
Figura 2.2. Fontes de combustíveis fósseis relacionadas com redução de emissões em 2050 (fonte: Stern [2]).	21
Figura 2.3. Distribuição da redução de emissões por tecnologia (fonte: Stern [2]).	21
Figura 2.4. Dependência Energética 2005–2014 (fonte: DGEG [14]).	23
Figura 2.5. Contributo das fontes de energia no abastecimento global (fonte: SRREN [3]).	24
Figura 2.6. Ciclo de vida de um edifício (fonte: EN ISO 15978:2011 [24]).	26
Figura 2.7. Consumo de energia final por setor na UE-27 (fonte: ADEME [7]).	28
Figura 2.8. Evolução prevista do consumo final bruto de energia [ktep]	
44	
Figura 2.9. Evolução da mini e microprodução [GWh] (fonte: DGEG [46]).	45
Figura 2.10. Evolução legislativa em Portugal (fonte: ADENE [49]).	48
Figura 2.11. Limites dos sistemas estabelecidos para avaliar o desempenho energético (fonte: Kurnitski [55]).	57
Figura 2.12. Curva de rentabilidade e as lacunas em relação aos nZEB e aos requisitos atuais (fonte: BPIE [56]).	59
Figura 2.13. Cálculo do valor residual da componente de um edifício (fonte: CE [11]).	60
Figura 2.14. Quatro subconjuntos de funcionalidades para definição de modelos edifícios de referência, de acordo com a metodologia DOE (fonte: Corgnati [63]).	65

Figura 2.15. Definição de espessura do isolamento ótimo de rentabilidade para os elementos de construção considerando o custo de investimento quase linear (fonte: Fokaidis [70]).	71
Figura 3.1. Ilustração da curva de rentabilidade ótima contemplando diferentes pacotes de medidas de eficiência.	84
Figura 3.2. Método e suas fases de estudo.	85
Figura 3.3. Comparação de custo de materiais de isolamento em função de sua resistência térmica.	89
Figura 3.4. Exemplos de componentes associados à Bomba de Calor (BC): a) unidade exterior; b) depósito de AQS.	91
Figura 3.5. Exemplo de unidade de distribuição de Ar Condicionado (AC).	92
Figura 3.6. Exemplos de componentes associados à Caldeira a Gás (CG): a) unidade central e depósito de AQS; b) emissores/radiadores.	92
Figura 3.7. Exemplo de Emissor Elétrico (EE).	93
Figura 3.8. Exemplo de Caldeira Elétrica (CE).	93
Figura 3.9. Exemplo de Esquentador a Gás (EG).	94
Figura 3.10. Exemplo de Solar Térmico de Termossifão (ST T).	96
Figura 3.11. Exemplo de Solar Térmico de Circulação Forçada (ST C).	96
Figura 3.12. Exemplo de Painel Fotovoltaico (PV).	97
Figura 3.13. Exemplo de Caldeira a Biomassa (CB).	99
Figura 3.14. Representação esquemática dos coeficientes de transferência de calor e das componentes de ganhos de calor [124].	100
Figura 3.15. Zonas climáticas de inverno, em Portugal.	103
Figura 3.16. Relação entre os graus-dias de aquecimento e radiação solar a sul para diferentes regiões de Portugal continental.	104
Figura 3.17. Exemplo de opções reais (fonte: Trigeorgis [111]).	111
Figura 3.18. Cenários para evolução dos preços de energia.	114
Figura 3.19. Influência do aumento de isolamento térmico nas necessidades de energia útil para aquecimento.	117
Figura 3.20. Redução na fatura de energia de aquecimento para diferentes sistemas em função do aumento de isolamento térmico.	117
Figura 3.21. Influência do aumento de isolamento térmico em interação com a substituição de janelas, nas necessidades de energia útil para aquecimento e no custo global para diferentes sistemas.	119
Figura 3.22. Influência das janelas e isolamento da cobertura nas necessidades de energia útil para aquecimento e no custo global para diferentes sistemas.	119
Figura 3.23. Influência das janelas nas necessidades de energia útil para aquecimento e no custo global para diferentes sistemas, em cenários sem isolamento.	120

Figura 3.24. Influência das janelas e do isolamento nas necessidades de energia útil para aquecimento e no retorno sobre o investimento para diferentes sistemas.	121
Figura 3.25. Influência das janelas e do isolamento nas necessidades de energia útil para aquecimento e no retorno sobre o investimento para EE.	121
Figura 3.26. Influência das janelas e do isolamento nas necessidades de energia útil para aquecimento e no retorno sobre o investimento para CG.	122
Figura 3.27. Desempenho de sistemas em termos de necessidades de energia primária em função das necessidades de energia útil para aquecimento e AQS.	125
Figura 3.28. Indicação de custo global de sistemas e energia em função das necessidades de energia útil para AQS, pelo procedimento expedito.	127
Figura 3.29. Indicação de custo global de sistemas e energia em função das necessidades de energia útil para aquecimento, pelo procedimento expedito.	128
Figura 3.30. Indicação de custo global de sistemas e energia em função das necessidades de energia útil para aquecimento e AQS, pelo procedimento expedito.	130
Figura 3.31. Indicação de custo global associado a sistemas e energia em função das necessidades de energia útil para aquecimento e AQS, pelo procedimento expedito (cenário em que AC combina com EG, $\eta_w, k = 0,60$).	132
Figura 3.32. Extrato do módulo <i>Referência</i> do $\$e^3$	134
Figura 3.33. Extrato do módulo <i>Energia</i> do $\$e^3$	134
Figura 3.34. Extrato do módulo <i>Custos</i> do $\$e^3$	134
Figura 3.35. Extrato do módulo <i>AES – Isolamentos</i> do $\$e^3$	135
Figura 3.36. Extrato do módulo <i>AES – Envidraçados</i> do $\$e^3$	135
Figura 3.37. Extrato do módulo <i>AES – Sistemas</i> do $\$e^3$	135
Figura 3.38. Extrato do módulo <i>dFER</i> do $\$e^3$	136
Figura 3.39. Extrato do módulo <i>Plano de simulação</i> do $\$e^3$	136
Figura 3.40. Extrato do módulo <i>SDE</i> do $\$e^3$	136
Figura 3.41. Extrato do módulo <i>SRM</i> do $\$e^3$	137
Figura 3.42. Representação das soluções utilizadas pelo AGe^3	139
Figura 3.43. Ilustração do operador de cruzamento.	140
Figura 4.1. Representação esquemática do edifício de referência – moradia unifamiliar.	151
Figura 4.2. Indicação de custo global de sistemas e energia para um cenário de simulação de 4.538 [kWh/a] de necessidades de energia útil para aquecimento e AQS, pelo procedimento expedito.	153
Figura 4.3. Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD: a) limite superior do custo do isolamento; b) limite inferior do custo do isolamento.	156
Figura 4.4. Custo global (eixo vertical y, em [€/m ²]) e necessidades de energia primária (eixo horizontal x, em [kWh/(m ² .a)]), na perspetiva financeira e para a zona climática	

	com 1570 GD – análise de sistemas de aquecimento: a) limite superior do custo do isolamento; b) limite inferior do custo do isolamento.	157
Figura 4.5.	Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira e para o limite inferior do custo do isolamento: a) edifício localizado na zona climática com 1924 GD; b) edifício localizado na zona climática com 987 GD.	159
Figura 4.6.	Custo global e necessidades de energia primária, nas perspetivas financeira e macroeconómica, para o limite inferior do custo do isolamento e todos os sistemas, na zona climática com 1570 GD: a) resultados para 13,4% das necessidades nominais de energia útil para aquecimento; b) resultados para 100% das necessidades nominais de energia útil para aquecimento.	161
Figura 4.7.	Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira, para o limite inferior do custo do isolamento e a zona climática com 1570 GD, sistemas CG e AC+EG: a) cenário de evolução dos preços de energia Eurostat; b) cenário de evolução linear dos preços de energia em 2,5%.	163
Figura 4.8.	Custo global e necessidades de energia primária, nas perspetivas financeira e macroeconómica, para o limite inferior do custo do isolamento e zona climática com 1570 GD: a) taxas de desconto de 6% (FIN) e 3% (MAC); b) taxas de desconto de 12% (FIN) e 6% (MAC).	165
Figura 4.9.	Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.	169
Figura 4.10.	Custo global e necessidades de energia primária de 154.000 pacotes e soluções não dominadas obtidas através do algoritmo genético AGe ³ , na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.	171
Figura 4.11.	Custo global e necessidades de energia primária de 154.000 pacotes, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.	173
Figura 4.12.	Custo global e necessidades de energia primária de 110.000 pacotes que incluem FER, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.	174
Figura 4.13.	Custo global e investimento adicional de 154.000 pacotes, na perspetiva financeira na abordagem de ROI, para a zona climática com 1570 GD e considerando o limite inferior do custo do isolamento: a) total; b) detalhe dos pacotes até um custo global de 200 [€/m ²] e um investimento adicional de 80 [€/m ²].	176

Figura 4.14. Custo global e necessidades de energia primária de 18 pacotes selecionados e cenário BAU, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.....	179
Figura 4.15. Custo global e investimento adicional de 18 pacotes selecionados e cenário BAU, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.	180
Figura 4.16. Custo global e investimento adicional de pacotes selecionados e cenário BAU, na perspetiva financeira (FIN = 3%) e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.....	182
Figura 4.17. Fotografia da “Casa das Talhas”, situada à Rua Fernandes Tomás n.ºs 58-66, na Zona Central C1, em Coimbra.....	187
Figura 4.18. Desenhos da “Casa das Talhas” com identificação do apartamento em análise: a) modelo 3D simplificado; b) fachada principal; c) seções A e B, primeiro e segundo pavimentos.....	189
Figura 4.19. Indicação de custo global de sistemas e energia para um cenário de simulação de 10.944 [kWh/a] de necessidades de energia útil para aquecimento e AQS, pelo procedimento expedito.....	192
Figura 4.20. Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1304 GD: a) limite superior do custo do isolamento; b) limite inferior do custo do isolamento.	195
Figura 4.21. Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira e para o limite inferior do custo do isolamento: a) edifício localizado na zona climática com 1924 GD; b) edifício localizado na zona climática com 987 GD.	196
Figura 4.22. Custo global e necessidades de energia primária, nas perspetivas financeira e macroeconómica, para o limite inferior do custo do isolamento e zona climática com 1304 GD: a) resultados para 100% das necessidades nominais de energia útil para aquecimento; b) resultados para 66% das necessidades nominais de energia útil para aquecimento.....	198
Figura 4.23. Custo global e necessidades de energia primária, nas perspetivas financeira e macroeconómica, para o limite inferior do custo do isolamento e zona climática com 1304 GD, no cenário de evolução linear dos preços de energia em 2,5%..	199
Figura 4.24. Custo global e necessidades de energia primária, nas perspetivas financeira e macroeconómica, para o limite inferior do custo do isolamento e taxas de desconto de 12% (FIN) e 6% (MAC): a) cenário de evolução linear dos preços de energia em 2,5%; b) cenário de evolução dos preços de energia Eurostat.	200
Figura 4.25. Custo global e necessidades de energia primária na perspetiva financeira de 2.058 pacotes, para a zona climática com 1304 GD e considerando o limite inferior do custo do isolamento: a) sem FER; b) com FER.....	202

Figura 4.26. Custo global e necessidades de energia primária de 15 pacotes selecionados e cenário BAU, na perspectiva financeira e para a zona climática com 1304 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.	205
Figura 4.27. Custo global e investimento adicional de 15 pacotes selecionados e cenário BAU, na perspectiva financeira e para a zona climática com 1304 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.	206
Figura 4.28. Emissões de gases com efeito estufa e impactos de energia primária não-renovável de pacotes de reabilitação energética com pacotes selecionados para CG (fonte: Tadeu [131]).	209
Figura 4.29. Definição da função de preferência no método PROMETHEE	219
Figura 4.30. Definição do problema em estudo, critérios e alternativas em avaliação.	220
Figura 4.31. Gráfico de rentabilidade, conforme Regulamento Delegado n.º 244.	223
Figura 4.32. <i>Ranking</i> parcial obtido pelo método PROMETHEE I representando a colocação das várias alternativas em estudo nos fluxos de preferência Phi+ (coluna da direita) e Phi- (esquerda).	224
Figura 4.33. <i>Ranking</i> completo obtido pelo método PROMETHEE II representando a colocação das várias alternativas em estudo no fluxo de preferência Phi.	225

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Barreiras de mercado e instrumentos para sua remoção (fonte: IPCC [3]).	30
Tabela 2.2. Impacto do setor residencial e serviços no PNAEE 2016.	36
Tabela 2.3. Impacto da medida “Isolamento Eficiente” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).	37
Tabela 2.4. Impacto da medida “Janela Eficiente” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).	38
Tabela 2.5. Impacto da medida “Calor Verde” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).	38
Tabela 2.6. Impacto da medida “Solar Térmico Residencial” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).	39
Tabela 2.7. Impacto da medida “Solar Térmico Serviços” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).	39
Tabela 2.8. Impacto da medida “SCE Edifícios Residenciais” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).	40
Tabela 2.9. Impacto da medida “SCE Edifícios de Serviços” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).	41
Tabela 2.10. Participação [%] de FER no consumo final bruto de energia (fonte: Eurostat [44]).	43
Tabela 2.11. Participação [%] de FER em eletricidade (fonte: Eurostat [44]).	44
Tabela 2.12. Participação [%] de FER em aquecimento e arrefecimento (fonte: Eurostat [44]).	45
Tabela 2.13. Relação entre os valores das necessidades nominais e limites, de energia útil para aquecimento, arrefecimento e energia primária de edifícios sujeitos a grandes intervenções.	54
Tabela 2.14. Tipos de renovação e estimativas de custo (fonte: BPIE [8]).	67
Tabela 2.15. Fatores de conversão de eletricidade em energia primária em [kWh _{EP} /kWh] (fonte: Ecofys [72]).	68
Tabela 2.16. Efeitos do VAL e das opções reais no valor global do investimento (fonte: Trigeorgis [111]).	77
Tabela 3.1. Ciclos de vida assumidos para os componentes e sistemas do edifício.	87
Tabela 3.2. Comparação de janelas e respetivos custos, em [€/r].	90
Tabela 3.3. Resumo de sistemas convencionais.	94
Tabela 3.4. Contributo anual de sistemas solares térmicos, em [kWh].	97
Tabela 3.5. Contributo anual de painéis fotovoltaicos, em [kWh].	98
Tabela 3.6. Resumo de sistemas baseados em FER.	99

Tabela 3.7. Relação entre os valores das necessidades nominais e limites, de energia útil para aquecimento, arrefecimento e energia primária de edifícios sujeitos a grandes intervenções.....	103
Tabela 3.8. Radiação solar [kWh/(m ² .a)] para três regiões e orientações.	105
Tabela 3.9. Síntese das taxas de desconto.....	115
Tabela 3.10. Características de sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados. 123	
Tabela 3.11. Custo de investimento para sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados.	126
Tabela 3.12. Ferramentas para aplicação do método	144
Tabela 4.1. Resumo das características dos edifícios dos casos de estudo.	148
Tabela 4.2. Características dimensionais do edifício de referência.	151
Tabela 4.3. Características térmicas do edifício de referência.....	151
Tabela 4.4. Espessuras de isolamento térmico e coeficientes de transmissão térmica das soluções de cobertura, paredes e pavimento.	152
Tabela 4.5. Sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados.	154
Tabela 4.6. Coeficientes de transmissão térmica de referência para elementos opacos, U_{ref} [W/(m ² .°C)].	158
Tabela 4.7. Comparação dos custos mensais com consumo de energia para diferentes cenários.	162
Tabela 4.8. Espessuras de isolamento térmico e coeficientes de transmissão térmica das soluções de cobertura, paredes e pavimento.	166
Tabela 4.9. Coeficientes de transmissão térmica e fatores solares das opções de janelas	167
Tabela 4.10. Sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados.	167
Tabela 4.11. Sistemas baseados em fontes de energia renováveis (FER).....	170
Tabela 4.12. Energia produzida pelos sistemas FER (E_r, k), em [kWh/(m ² .a)].....	170
Tabela 4.13. Cenário BAU (pacote 0) e 18 pacotes selecionados.	178
Tabela 4.14. Análise resumida das opções reais.	180
Tabela 4.15. Características dimensionais do edifício de referência.	190
Tabela 4.16. Características térmicas do edifício de referência.....	190
Tabela 4.17. Espessuras de isolamento térmico e coeficientes de transmissão térmica das soluções de cobertura, paredes e pavimento.	191
Tabela 4.18. Sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados.....	192
Tabela 4.19. Cenário BAU (pacote 0) e 15 pacotes selecionados.	203
Tabela 4.20. Análise resumida das opções reais.....	207
Tabela 4.21. Necessidades de energia útil para aquecimento [kWh/(m ² .a)] por espessuras de isolamento [mm] da cobertura e das paredes exteriores, por regiões de Portugal. 208	

Tabela 4.22. Características dimensionais do edifício de referência.....	213
Tabela 4.23. Características térmicas do edifício de referência.	213
Tabela 4.24. Sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados.	215
Tabela 4.25. Sistemas baseados em fontes de energia renováveis (FER).	215
Tabela 4.26. Energia produzida pelos sistemas FER (E_r, k), em [kWh/(m ² .a)].	215
Tabela 4.27. Tabela de desempenhos das alternativas nos critérios avaliados.	222
Tabela 4.28. Contribuição ([%] do total de pontos) de cada alternativa para cada <i>ranking</i> ..	223

ABREVIATURAS

- AC – Sistema de Ar Condicionado;
- ACV – Análise de Ciclo de Vida;
- ADENE – Agência para a Energia, de Portugal;
- AQS – Águas Quentes Sanitárias;
- AVAC – Aquecimento, Arrefecimento, Ventilação e Ar Condicionado;
- BAU – Negócio como de costume (*Business-As-Usual*);
- BC – Bomba de Calor;
- BPIE – *Building Performance Institute Europe*;
- CB – Caldeira a Biomassa (*pellets*);
- CCS – Captura e armazenamento de carbono (*Carbon Capture and Storage*);
- CDE – Certificado de Desempenho Energético;
- CE – Comissão Europeia ou EC (*European Commission*);
- CE – Caldeira Elétrica;
- CG – Caldeira a Gás;
- dCHP – Geração doméstica combinada de calor e energia (*domestic Combined Heat and Power*);
- DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia;
- EE – Emissor Elétrico;
- EED – Diretiva para a eficiência energética (*Energy Efficiency Directive*);
- ENEA – Agência nacional italiana para novas tecnologias, energia e desenvolvimento económico sustentável (a sigla advém de *Ente Nazionale per l'Energia Atomica*);
- EPBD – Diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios (*Energy Performance of Buildings Directive*);
- EPS – Poliestireno expandido (*Expanded PolyStyrene*);
- ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos;
- ETICS – Sistema de isolamento térmico pelo exterior (*External Thermal Insulation Composite Systems*);
- Eurostat – Área de estatística da Comissão Europeia;
- FEE – Fundo de Eficiência Energética;
- FER – Fontes de Energia Renováveis;
- FIT – Tarifa-prémio (*Feed-In Tariff*);
- GEE – Gases com Efeito Estufa;
- GW – Fibra de vidro;
- ICB – Aglomerado de cortiça expandida (*Expanded Cork Agglomerate*);
- ICB-MD – Aglomerado de cortiça expandida com massa volumétrica média (*Expanded Cork Agglomerate - Medium Density*);
- ICESD – Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico;
- IEA – Agência internacional de energia (*International Energy Agency*);

IEE – Energia inteligente para a Europa (*Intelligent Energy Europe*);
IGESPAR – Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico;
INE – Instituto Nacional de Estatística, de Portugal;
IPCC – Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*);
IVA – Imposto sobre Valor Acrescentado;
ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção;
LEAP – *Long Range Energy Alternatives Planning System*;
MW – Lã mineral (*Mineral Wool*);
NSGA-II – Algoritmo genético de classificação por não dominância II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*);
nZEB – Edifício com consumo quase nulo de energia (*nearly Zero-Energy Building*);
PIB – Produto Interno Bruto;
PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética;
PNAER – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis;
PUR – Poliuretano rígido;
PV – Painel fotovoltaico;
PVC – Policloreto de polivinila (ou policloreto de vinil);
OMIE – Operador do Mercado Ibérico de Energia;
ONGs – Organizações Não Governamentais;
QREN – Quadro de Referência Estratégico Nacional;
RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios;
RCLE-UE – Regime de Comércio de Licenças de Emissões da União Europeia;
RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços;
REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação;
REHVA – Federação europeia das associações de aquecimento, ventilação e AC (*Federation of European Heating, Ventilation and Air-Conditioning Associations*);
RES – Diretiva das fontes de energia renováveis (*Renewable Energy Sources*);
ROI – Retorno sobre o investimento (*return on investment*);
RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios;
SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior;
SRREN – Relatório especial sobre energias renováveis e mitigação de mudanças do clima (*Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*);
ST C – Sistema Solar Térmico de Circulação forçada;
ST T – Sistema Solar Térmico de Termossifão;
TIR – Taxa Interna de Retorno;
UE – União Europeia ou EU (*European Union*);
VAL – Valor Atualizado Líquido;
XPS – Poliestireno extrudido (*eXtruded PolyStyrene*).

SIMBOLOGIA

°C – Graus Celsius;

A – Área, em [m²];

a – Ano;

cm – Centímetro;

CO₂ – Dióxido de carbono;

CO_{2e} – Dióxido de carbono equivalente;

GD – Graus-dias;

Gt – Giga tonelada;

kg – Quilograma;

kgCO₂/kWh – Quilograma de emissões de dióxido de carbono por quilowatt-hora;

kg_{ep} – Quilograma equivalente de petróleo;

kWh – Quilowatt-hora;

kWh_{EP} – Quilowatt-hora de energia primária;

kWp – Quilowatt-pico;

l – Litro;

λ – Condutividade térmica;

m² – Metro quadrado;

m³ – Metro cúbico;

mm – Milímetro;

η – Eficiência do sistema;

N_{ic} – Necessidades de energia útil para aquecimento, em [kWh/(m².ano)];

N_t – Valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia primária, em [kWh/(m².a)];

N_{tc} – Necessidades nominais globais de energia primária, em [kWh/(m².a)];

N_{vc} – Necessidades de energia útil para arrefecimento, em [kWh/(m².a)];

ppm – partes por milhão;

P_u – Potência útil, em [Kw];

Q_a – Necessidades de energia útil para produção de águas quentes sanitária, em [kWh/(m².a)];

r – Resistência térmica;

R – Taxa de desconto;

tCO₂/MWh – toneladas de CO₂ por megawatt-hora;

tep – Tonelada equivalente de petróleo;

U – Coeficiente de transmissão térmica, em [W/(m².°C)];

W – Watt.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e motivação

O desenvolvimento sustentável implica o equilíbrio entre a exploração dos recursos naturais, de maneira a satisfazer atuais necessidades do ser humano, e a garantia de renovação destes recursos, preservando a capacidade de suprimento às gerações futuras [1]. Todavia, pode-se afirmar que a manutenção do cenário atual de uso de fontes esgotáveis de energia e de altos índices de emissões de gases com efeito estufa (GEE), provocados pela nossa sociedade, ocasionará um aumento das temperaturas globais ([2], [3]).

A estabilização das concentrações de GEE exigirá cortes profundos das emissões. Se, até 2050, ocorrer um substancial aumento da eficiência energética e as fontes de energia renováveis (FER) alcançarem uma participação superior a 50% na produção de energia primária do mundo, será possível conter o aquecimento global [4]. No entanto, iniciativas visando a redução do uso de combustíveis fósseis têm esbarrado na escassez de alternativas economicamente viáveis, de produção e distribuição de energia, com a qual muitos países se deparam. O alto custo de algumas tecnologias emergentes, as quais poderiam contribuir para a mudança deste cenário, tem impedido o compromisso das nações com metas mais ambiciosas de redução de emissões de CO₂.

Por outro lado, as ações estratégicas que pretendem reduzir a dependência energética, criar um modelo energético descentralizado, diversificar as fontes de abastecimento e reduzir a intensidade energética, têm demonstrado o potencial que as energias renováveis têm para viabilizar o alcance destes objetivos e até mesmo influenciar o cenário geopolítico. Cada vez mais surgem evidências de que o desenvolvimento sustentável é possível, desde que se consiga integrar o crescimento económico com o equilíbrio ambiental e com a equidade social [1].

Já existem exemplos concretos de que é possível manter o desenvolvimento, reduzir emissões e, ao mesmo tempo, aumentar a segurança energética (garantia de aprovisionamento). Portanto, se eficiência energética e FER contribuem substancialmente para a diminuição da dependência energética e para a mitigação das mudanças climáticas, serão necessárias várias formas de apoio económico, bem como políticas para criar um ambiente favorável. Estas políticas devem ser direcionadas à remoção de barreiras e à eliminação de falhas de mercado já identificadas.

Neste sentido, as políticas implementadas pela União Europeia (UE) são um bom exemplo. Foram traçadas metas ambiciosas como a conhecida UE 20-20-20 em que se estabeleceram três objetivos fundamentais a atingir em 2020: a redução de 20% das emissões de GEE relativamente aos níveis de 1990; a melhoria de 20% na eficiência energética; e o aumento da energia produzida a partir de FER para 20% [5]. A UE estabelece também, como objetivo, a redução de 80 a 95% dos níveis de emissões de GEE até 2050, comparativamente a 1990 [6].

Para que estas metas sejam alcançadas é imprescindível uma ação rápida e forte nos setores com o uso de energia mais intensivo e, neste aspeto, as cidades assumem relevância. A taxa de urbanização tem vindo a crescer em todo o mundo, sendo que a opção de viver em centros urbanos já atingiu mais de 50% da população mundial. O metabolismo das cidades e a forma como evoluem são fatores determinantes a serem considerados nos objetivos de um desenvolvimento sustentável. A interação entre os edifícios, o seu entorno e o meio ambiente afeta a sustentabilidade nas cidades e, portanto, deve ser plenamente compreendida para possibilitar uma ação efetiva.

A indústria da construção e o uso de edifícios têm grande impacto no consumo de energia, sendo importantes fontes de emissões de dióxido de carbono. Assim, os critérios de sustentabilidade na construção devem ser aplicados em todos os níveis e estar relacionados com os diferentes estágios da existência dos edifícios.

Em 2010, os edifícios representavam 41% do consumo de energia final na UE, dos quais 14% eram relativos ao setor terciário e 27% relativos às habitações (o que representa cerca de 2/3 do consumo total de energia em edifícios) [7]. Estima-se que existam mais 25 mil milhões de [m²] de área útil edificada [8] na UE, cuja distribuição geográfica é demonstrada na Figura 1.1.

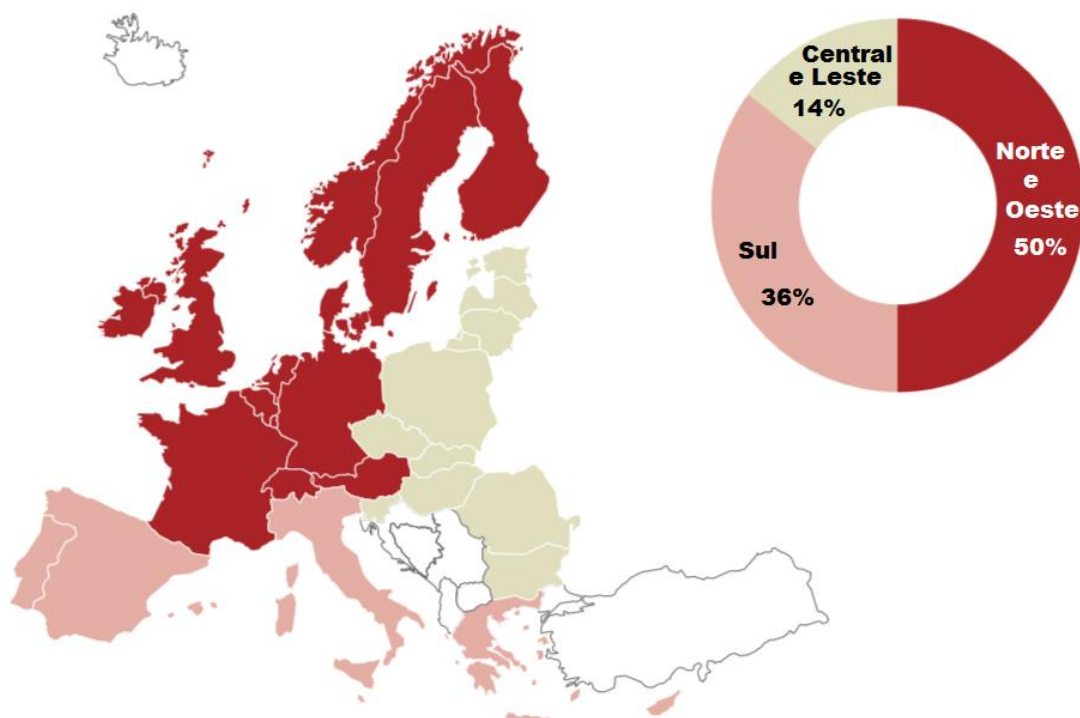


Figura 1.1. Distribuição da área útil edificada, na União Europeia (fonte: BPIE [8]).

Deste total, 75% pertencem ao setor residencial, o qual apresenta taxas de crescimento anual em torno de 1%. Os edifícios unifamiliares representam 64% do parque habitacional europeu [8], como se pode observar na Figura 1.2.

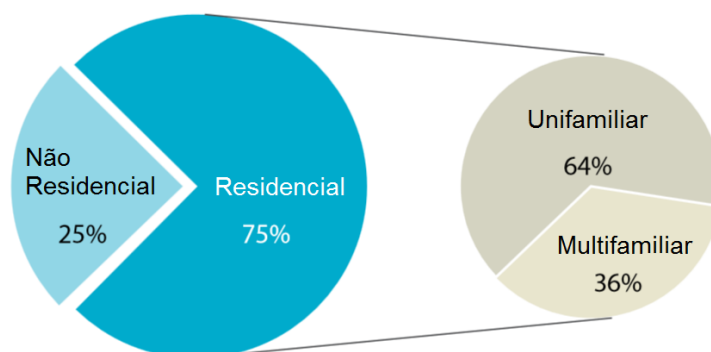


Figura 1.2. Distribuição da área útil edificada por categorias de edifícios, na União Europeia (fonte: BPIE [8]).

Dado o seu longo ciclo de renovação, os edifícios sujeitos a grandes intervenções devem cumprir requisitos mínimos de desempenho energético, adaptados ao clima local [9]. As grandes renovações de edifícios são uma oportunidade para tomar medidas rentáveis para melhorar o desempenho energético. Uma parcela significativa do parque de edifícios residenciais europeu é bastante antiga, como mostra a Figura 1.3.

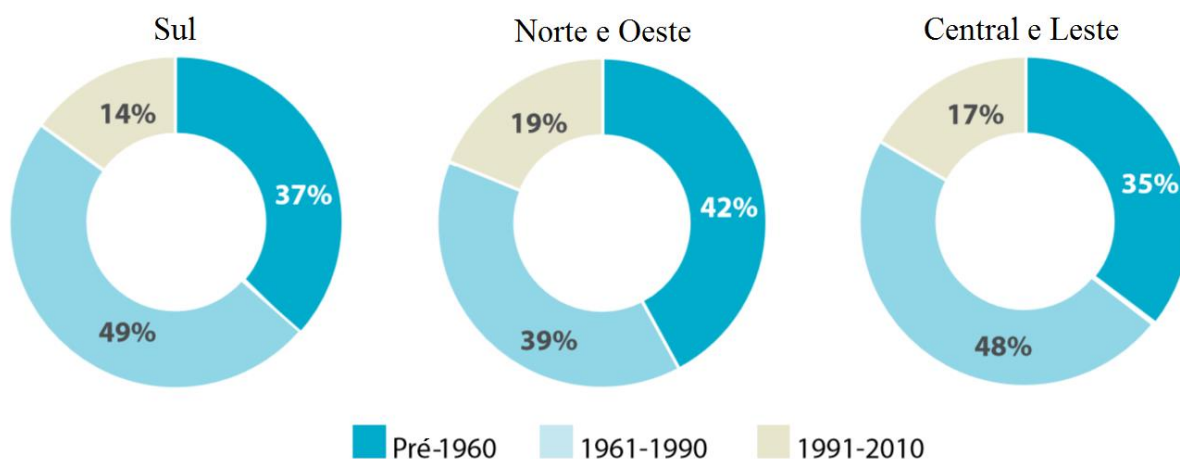


Figura 1.3. Distribuição do parque residencial por época de construção, até 2010 e na União Europeia (fonte: BPIE [8]).

É então, cada vez mais relevante impor requisitos energéticos aos edifícios, em particular aos existentes. De igual forma, as políticas energéticas e incentivos que se implementem devem assegurar viabilidade económica e ambiental, durante o ciclo de vida dos edifícios.

A Diretiva 2010/31/UE, relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD), exige que os Estados-Membros da UE estabeleçam um quadro metodológico comparativo para o cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios, mas permite que edifícios oficialmente protegidos, pertencentes a um ambiente classificado ou com valor arquitetónico ou histórico especial, se constituam em exceção a esta exigência, na medida em que o cumprimento de certos requisitos mínimos de desempenho energético poderia alterar de forma inaceitável o seu carácter ou o seu aspeto.

O Regulamento Delegado (UE) n.º 244 [10] complementa a EPBD e apresenta a metodologia de cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade nas perspetivas macroeconómica (inclui benefícios para a sociedade) e financeira (somente retorno do investimento), deixando aos Estados-Membros a incumbência de determinar qual destes modos de cálculo produzirá o padrão de referência nacional, relativamente ao qual serão avaliados os requisitos mínimos de desempenho energético nacionais.

Na definição de medidas de eficiência energética e de medidas baseadas em FER, deve-se criar edifícios de referência representativos do parque existente e ter em conta os componentes com maior influência em seu desempenho energético. Assim, as principais medidas resumem-se, quase sempre, à aplicação de isolamento térmico na envolvente opaca, à substituição de vãos envidraçados e à substituição de sistemas de climatização e preparação de águas quentes sanitárias (AQS) por equipamentos mais eficientes.

Os edifícios podem incorporar FER e transformar-se em sistemas altamente eficientes e geradores de energia limpa [9]. A seleção criteriosa das alterações a serem introduzidas tem papel fundamental na obtenção de níveis de rentabilidade satisfatórios para o investimento.

Ocorre que, mesmo a perspetiva financeira apresentada no Regulamento Delegado (UE) n.º 244, é dirigida a autoridades nacionais e não a investidores e o nível ótimo de rentabilidade não é calculado para cada caso, mas sim para desenvolver disposições regulamentares aplicáveis a nível nacional.

O Regulamento afirma que os níveis ótimos de rentabilidade obtidos com os cálculos não serão necessariamente os níveis ótimos para cada combinação edifício/investidor. Contudo, admite que, se adotarem uma abordagem sólida em matéria de determinação dos edifícios de referência, os Estados-Membros podem assegurar que os requisitos aplicáveis se adequam à maioria dos edifícios [11].

De facto, o exercício de cálculo pode fornecer a Estados-Membros informações sobre a lacuna financeira existente para determinados grupos de investidores e fundamentar, assim, as políticas que venham a adotar. Por exemplo, a diferença entre a rentabilidade ótima em termos macroeconómico e financeiro pode dar indicações sobre o apoio financeiro necessário para tornar os investimentos em eficiência energética e no uso de fontes de energias renováveis economicamente interessantes para o investidor [11].

Basicamente, a seleção de medidas deste tipo está inserida no contexto da estrutura clássica de análise de opções de investimento que se excluem mutuamente, no qual duas ou mais opções não podem ser exercidas simultaneamente. Quase todas as decisões do mundo real sobre os investimentos envolvem este tipo de escolha. Neste caso, pacotes (ou combinações de medidas) excludentes envolvem uma interação de soluções possíveis, uma vez que, assumindo-se determinadas medidas, exclui-se outras [12].

No cálculo proposto pelo Regulamento Delegado (UE) n.º 244 é necessário determinar o Valor Atualizado Líquido (VAL) de cada pacote. De entre as opções que proporcionam uma redução do VAL do custo global e atendam requisitos regulamentares, deve-se escolher aquelas cujo VAL é menor, tendo em conta o ciclo económico estimado para a categoria de edifícios em estudo.

No entanto, não é tão simples para o proprietário de um edifício avaliar e escolher um pacote de medidas de entre um grande número de combinações possíveis [13]. Além disso, é importante ter em mente a necessidade de se resolverem três questões importantes:

- a) O momento de decisão de investimento – deve-se investir agora ou esperar e reavaliar as opções mais tarde novamente? Neste caso, o investimento de hoje está competindo com outros e com possíveis investimentos futuros;
- b) A decisão de substituição – por exemplo, quando devem ser substituídos os sistemas técnicos? Usá-los mais um ano pode atrasar investimentos em substituição e impedir poupanças imediatas de energia;
- c) A escolha entre as soluções de longa e de curta duração – o proprietário deve poupar dinheiro hoje, por exemplo através da aquisição de sistemas mais baratos, que podem não durar tanto tempo? Neste caso, a decisão de hoje pode influenciar (acelerar) um investimento mais tarde [12].

Mesmo na perspetiva financeira da metodologia proposta pela CE, não são consideradas questões de irreversibilidade (quando, em caso de arrependimento ou recuo na decisão, não é possível recuperar todo ou a maior parte do capital investido) e a possibilidade de diferimento (adiamento) ligadas às opções reais, intrínsecas a este tipo de investimento.

Para além do facto de existirem inúmeras expectativas individuais a respeito dos investimentos, há também a questão do âmbito dos custos e benefícios a serem considerados. Assumem-se apenas os custos e benefícios imediatos da decisão de investimento (ou seja, a perspetiva financeira), ou têm-se também em conta outros custos e benefícios indiretos (frequentemente designados por externalidades), que são desencadeados por um investimento em eficiência energética e aplicáveis a outros intervenientes no mercado para além do investidor (perspetiva macroeconómica)? Cada uma destas perspetivas tem uma fundamentação específica e incide em abordagens diferentes [11].

Assim, na perspetiva financeira dos investidores ou proprietários de edifícios, são necessários instrumentos de análise dos investimentos em reabilitação energética, os quais proporcionem informações claras e favoreçam a tomada de decisão. Na perspetiva macroeconómica, a compreensão das variáveis e parâmetros mais importantes nos estudos de rentabilidade de medidas é essencial para o estabelecimento de políticas públicas para a remoção de barreiras e a promoção da eficiência energética e o uso de energias renováveis em edifícios.

- **O exemplo de Portugal**

É importante perceber como o compromisso com a mitigação de alterações climáticas, as questões geopolíticas relacionadas com a energia e os mecanismos de regulação incidem no contexto de um determinado país. Em Portugal, a maior parte do combustível fóssil, consumido na produção de energia, é importado. Este fator, unido aos escassos recursos naturais, provoca uma taxa de dependência energética de 71%, muito acima da média europeia (em torno de 53%) [14]. Para alcançar os compromissos internacionais assumidos pelo país, vigoram instrumentos de planeamento estratégico em termos de eficiência energética e de utilização de energia proveniente de fontes renováveis, sendo eles o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) [15]. Os referidos planos identificam as metas a atingir, as barreiras existentes, bem como o potencial de melhoria em matéria de eficiência energética e de incorporação de energia proveniente de fontes renováveis nos vários setores de atividade, tendo em conta a realidade portuguesa [15].

Ao nível dos edifícios, o Decreto-Lei 118/2013 [16] impõe requisitos regulamentares, no sentido de satisfazer as exigências de conforto térmico, de garantia de qualidade do ar interior, bem como das necessidades de preparação de águas quentes sanitárias (AQS), sem dispêndios excessivos de energia. Em 2010, o setor residencial contribuiu para cerca de 18% do consumo final de energia, dos quais 30% se refere ao consumo de eletricidade. O setor residencial é o terceiro maior consumidor de energia em Portugal, e o de serviços tem uma participação de 12% no total nacional, conforme ilustra a Figura 1.4.

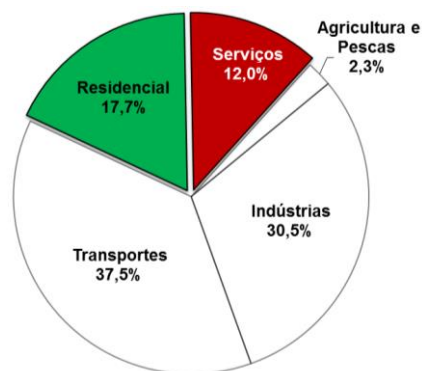


Figura 1.4. Repartição do consumo total de energia por setor de atividade, em Portugal (fonte: ICESD [17]).

As famílias gastam em média € 840 em energia por ano, uma média de € 70 por mês [17]. Nas habitações (ou alojamentos), a eletricidade passou a ser a principal fonte de energia, relegando a lenha ao segundo lugar, conforme ilustra a Figura 1.5. Além de ser a fonte de energia que apresenta maior consumo em [tep] (42,6%), a eletricidade tem também a maior participação na despesa com energia nas habitações (62,2%). A eletricidade é a única fonte comum a todos os usos de energia (aquecimento, arrefecimento, produção de AQS, cozinha, equipamentos elétricos e iluminação), demonstrando a crescente eletrificação dos alojamentos portugueses [17].

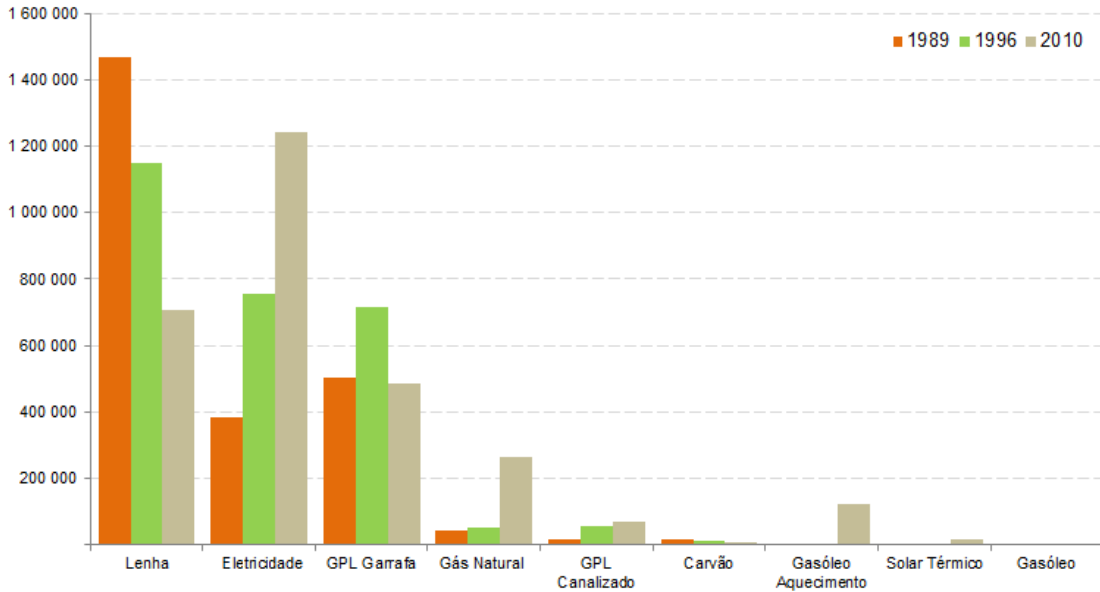
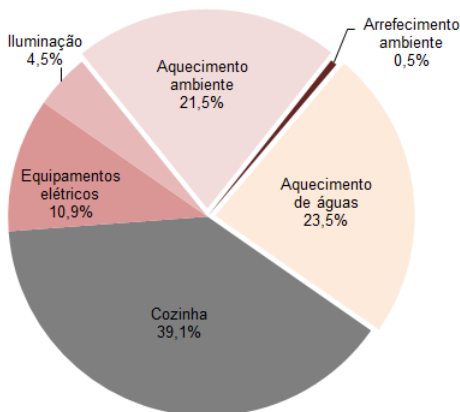


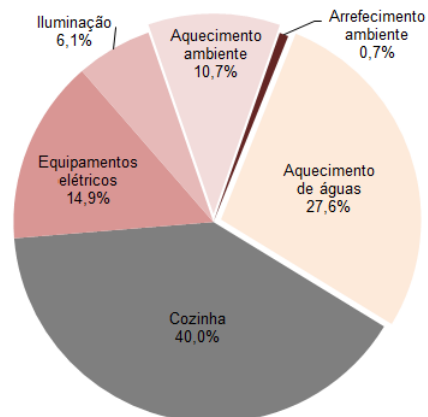
Figura 1.5. Evolução do consumo de energia em [tep] nos alojamentos em 1989, 1996 e 2010, por tipo de fonte de energia, em Portugal (fonte: ICESD [17]).

A cozinha, incluindo o consumo associado aos grandes e pequenos eletrodomésticos, é a principal responsável pelo consumo energético nas habitações. Em segundo lugar, surge a produção de AQS e, em terceiro, o aquecimento do ambiente. Apenas 0,5% da energia consumida no setor residencial é usada no arrefecimento. Em termos de despesa com energia, a participação do aquecimento do ambiente cai para o quarto lugar, devido a ainda significativa parcela da lenha, neste tipo de uso [17], conforme ilustra a Figura 1.6.

a) Consumo por tipo de uso



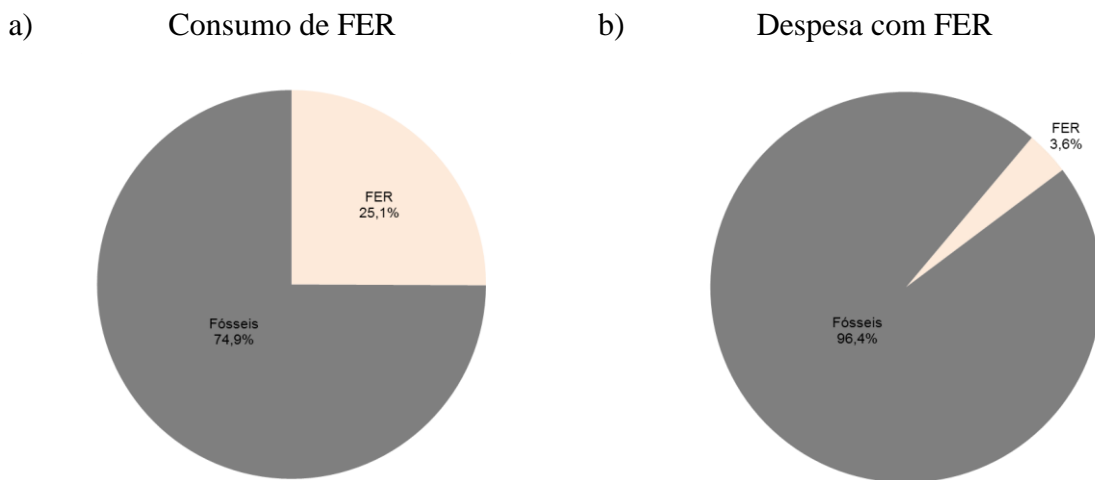
b) Despesa por tipo de uso



Nota: O consumo de energia pelos equipamentos elétricos exclui equipamentos para aquecimento e arrefecimento do ambiente, produção de AQS e cozinha.

Figura 1.6. Tipos de uso de energia nas habitações, em Portugal: a) consumo por tipo de uso [%]; b) despesa por tipo de uso [%] (fonte: ICESD [17]).

Uma parte relevante da energia consumida nas habitações portuguesas, 25,1%, provém de FER (lenha, carvão vegetal, sistemas solares térmicos), mas representa apenas 3,6% da despesa total, como mostra a Figura 1.7. Isto deve-se, principalmente, ao baixo custo e à significativa participação da lenha nos fornos de cozinhas e no aquecimento do ambiente.



Nota: Não inclui a parte renovável da eletricidade nem os biocombustíveis.

Figura 1.7. Uso de energia proveniente de fontes renováveis nas habitações, em Portugal: a) consumo de FER [%]; b) despesa com FER [%] (fonte: ICESD [17]).

Em Portugal, o período de construção predominante é entre 1961 e 1990, mas as edificações anteriores a 1960 representam uma percentagem considerável do setor de edifícios (29%), como se pode verificar na Figura 1.8 [17].

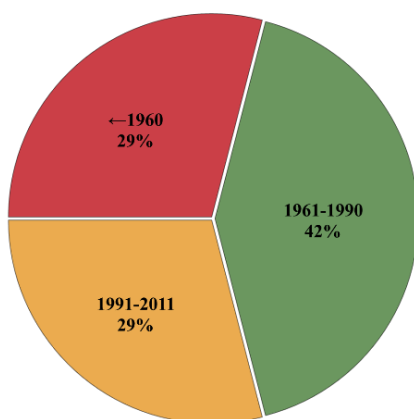


Figura 1.8. Edifícios segundo a época de construção, em Portugal (fonte: ICESD [17]).

As edificações antigas, principalmente as anteriores a 1960, são responsáveis por valores muito elevados de consumos energéticos para aquecimento [8] (ver Figura 1.9) e um esforço de reabilitação destes edifícios pode, de facto, contribuir para uma maior economia de energia.

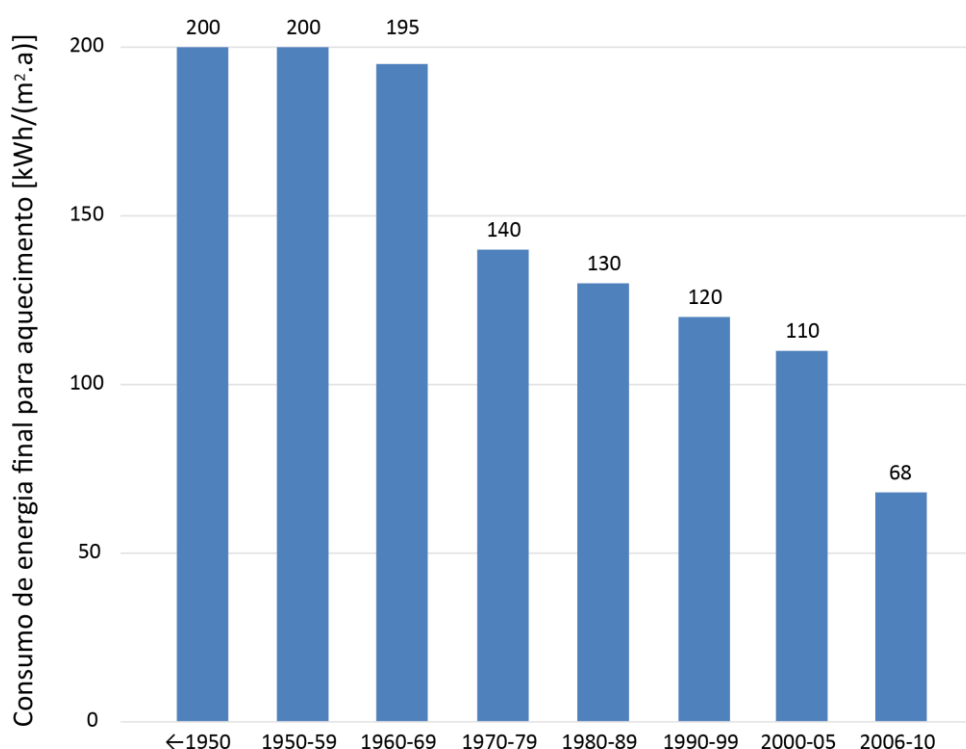


Figura 1.9. Consumo médio para aquecimento de habitações unifamiliares por ano de construção, em [kWh/(m².ano)] (fonte: BPIE [8]).

Em várias cidades de Portugal, verifica-se a existência de habitações antigas bastante debilitadas, na maioria dos casos devido à falta de implementação de medidas de conservação ou de manutenção. Portanto, é essencial atuar na reabilitação energética de edifícios, em especial dos mais antigos e ineficientes, definindo algumas técnicas de intervenção consideradas mais adequadas para responder às exigências de conforto atuais, além de garantir condições de salubridade e desempenho energético satisfatório.

Da mesma forma que ocorre na EPBD, o Decreto-Lei 118/2013 [16] não impõe requisitos regulamentares aos edifícios oficialmente protegidos, como parte de um ambiente classificado ou devido ao seu valor arquitetónico ou histórico especial, permitindo que se constituam em exceção às exigências requisitos mínimos de desempenho energético para estes edifícios.

A relevância da categoria dos edifícios antigos justifica-se pela sua crescente participação no parque edificado. O Instituto Nacional de Estatística (INE) contabiliza 899.379, edifícios de habitação anteriores a 1960, 25,4% do total (dados de 2011) [18]. Segundo o Instituto de Gestão do Património Arquitetónico e Arqueológico (IGESPAR) [19], atualmente Portugal conta com mais de 3.700 edificações classificadas devido ao seu valor arquitetónico ou histórico especial. Ocorre que a quantidade de edifícios com restrições é muito maior. Por exemplo, na tipologia Núcleo Histórico, o IGESPAR contabiliza apenas a zona histórica do Porto, mas, na verdade, esta área conta com cerca 3.200 edifícios, 6% dos da cidade, com uma área construída de 820.000 m² [20].

1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo principal estudar a rentabilidade da reabilitação energética de edifícios. Este objetivo desdobra-se no estudo de medidas de eficiência energética e de uso de fontes de energia renováveis em edifícios. Além disso, o objetivo principal divide-se numa série de objetivos intermédios, descritos a seguir:

- Inicialmente, pretende-se compreender por que motivo a reabilitação energética de edifícios é encarada como uma ação desejável e que atende o bem comum da sociedade. Compreender também como esta ação pode corroborar para o desenvolvimento sustentável, bem como interagir com o equilíbrio de interesses sociais, ambientais e económicos.
- Em seguida, enunciar as principais barreiras e falhas de mercado que impedem a efetiva implementação desta ação. Conhecer os principais entraves e o papel dos intervenientes no processo de tomada de decisão, nos diversos níveis: individual, local, regional, nacional e internacional.
- Descrever as principais estratégias políticas para remoção destas barreiras e eliminação das falhas de mercado já identificadas, ao nível europeu. Analisar a transposição das políticas nos Estados-Membros, usando como exemplo o caso de Portugal. No contexto português, descrever os principais instrumentos de planeamento estratégico que influenciam a adoção de medidas eficiência energética e o uso de fontes de energia renováveis em edifícios.
- Conhecer a regulamentação aplicável ao desempenho energético e à avaliação da rentabilidade da reabilitação energética de edifícios, em âmbito europeu e nacional. Identificar oportunidades de melhoria na abordagem da regulamentação aplicável, tendo por base as perspetivas financeira e macroeconómica.
- Desenvolver e propor uma abordagem metodológica para estudos de rentabilidade e criar ferramentas que possam ser, posteriormente, customizadas para auxiliar os principais intervenientes da reabilitação energética de edifícios: proprietários, peritos, fornecedores e autoridades.
- Ainda no âmbito do desenvolvimento desta abordagem metodológica, conhecer as principais medidas utilizadas para reabilitação energética de edifícios na Europa. Compreender a interação entre medidas, identificar e testar os parâmetros com maior impacto na rentabilidade.
- Utilizando o exemplo de Portugal, aplicar o método proposto ao estudo da rentabilidade de medidas de eficiência energética e do uso de fontes de energias renováveis em edifícios. Nesse sentido, de entre as medidas de reabilitação mais utilizadas na Europa, selecionar as mais adequadas para aplicação, no contexto português. Levantar preços representativos das soluções que compõem estas medidas e realizar estudos preliminares para adquirir

sensibilidade em relação aos parâmetros mais relevantes e, de seguida, ajustar e validar o método.

O presente trabalho tem uma preocupação com o carácter prático dos conceitos aqui estudados. Portanto, todas as recomendações apresentadas devem ser confrontadas com os atuais requisitos mínimos de desempenho energético, aos quais os proprietários de edifícios estão sujeitos. Assim, pretende-se aplicar o método proposto e comparar seus resultados com os da metodologia recomendada no Regulamento Delegado n.º 244 [10], inclusive com as exigências impostas aos Estados-Membros, além dos requisitos mínimos nacionais.

Os casos de estudo são essenciais para oferecer uma visão, mais abrangente possível, de cenários para reabilitação energética de edifícios, no contexto nacional. Logo, pretende-se analisar três casos de estudo que contemplem: as categorias mais relevantes de edifícios residenciais no contexto português, as épocas de construção com maior potencial de redução de consumo de energia e uma classe de edifícios com restrições arquitetónicas para implementação de medidas. No final, pretende-se ainda avaliar a perceção de moradores em relação ao valor e à utilidade da reabilitação energética de edifícios.

Assim, a análise prevista para os casos de estudo implica as seguintes ações:

- Definir um edifício de referência virtual que seja representativo de sua categoria e sua funcionalidade e condições climáticas, incluindo a geometria e características térmicas da envolvente, bem como os sistemas relacionados com o conforto térmico para os tipos de uso mais comuns, conforme hábitos de climatização, em âmbito nacional. O edifício de referência deve abranger a categoria e o uso com maior participação no parque edificado.
- Selecionar um edifício real que seja oficialmente protegido, como parte de um ambiente classificado ou devido ao seu valor arquitetónico ou histórico especial, e que se constitua em exceção a exigência de requisitos mínimos de desempenho energético, na medida em que o cumprimento de certos requisitos mínimos de desempenho energético possa alterar de forma inaceitável o seu carácter ou o seu aspeto.
- Definir pacotes (combinação de medidas) de eficiência energética adequadas aos edifícios em estudo. Considerar as soluções mais utilizadas para eficiência energética e o uso de fontes de energia renováveis, no país. As medidas devem ser escolhidas de forma a se adaptarem às características especiais dos edifícios em estudo, mas devem também atender os requisitos mínimos de desempenho estabelecidos na regulamentação portuguesa.
- Avaliar as necessidades de energia primária dos edifícios em estudo, antes e depois das medidas de eficiência energética definidas terem sido aplicadas aos mesmos. Nos referidos estudos, calcular as necessidades energéticas utilizando-se o método sazonal, mas considerar ao menos uma comparação com a simulação dinâmica.

- Com recurso às ferramentas de otimização e critérios de avaliação de investimento desenvolvidos no âmbito do método proposto, calcular o custo global das medidas de eficiência energética aplicadas aos edifícios em estudo, durante o ciclo de vida económico recomendado, tendo em conta os custos de investimento, custos operacionais e de manutenção, ganhos de energia produzida e valores residuais. Considerar estimativas de longo prazo de custos de carbono e a evolução dos preços da energia. Avaliar e comparar os níveis ótimos de rentabilidade alcançados com os requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios, em vigor em Portugal.
- A partir da identificação dos níveis ótimos de rentabilidade em um determinado caso de estudo, aplicar a metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) para perceber as diferenças entre as melhores opções do ponto de vista económico e ambiental.
- Com base nos resultados obtidos com os estudos de rentabilidade de medidas de eficiência energética e do uso de fontes de energia renováveis em edifícios, criar cenários de reabilitação para uma habitação que seja representativa da categoria mais presente no parque edificado português. Com recurso a métodos multicritério, submeter estes cenários de reabilitação à avaliação de um pequeno grupo de entrevistados e ponderar a sua perceção de valor e utilidade em relação às diferentes opções de reabilitação energética de edifícios.

A fundamentação apresenta os principais conceitos teóricos necessários ao desenvolvimento deste trabalho, representando suporte aos estudos, análises e reflexões sobre os dados e informações recolhidas. Por meio desta fundamentação teórica, são formulados conceitos necessários ao estabelecimento do quadro metodológico comparativo para o cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade de medidas de eficiência energética que incorporam FER.

Em suma, pretende-se verificar até que ponto este problema observado, da complexidade na análise e tomada de decisão neste tipo de investimento, pode ser explicado e resolvido pelas teorias já construídas e à disposição.

Como conclusão, o presente estudo tem o objetivo de recomendar, em linhas gerais, alguns instrumentos que permitam dirigir investimentos públicos e/ou privados às medidas de eficiência energética e ao uso de fontes de energia renováveis, particularmente em edifícios existentes e sob a perspetiva macroeconómica.

Cumpre salientar que esta tese ambiciona contribuir com informações relevantes sobre a experiência da União Europeia e também servir de referência metodológica para trabalhos de investigação científica sobre eficiência energética e uso de fontes de energias renováveis em edifícios no Brasil.

1.3 Estrutura da tese

Ao abordar aspetos económicos e a utilização racional dos recursos energéticos, esta tese recorre a conceitos provenientes de diferentes áreas do conhecimento. A busca de uma visão abrangente sobre o aumento da eficiência energética e o uso de energias renováveis em edifícios obriga a incursão, não só nos domínios das ciências exatas aplicadas, mas também no campo das ciências sociais.

Por outro lado, muito mais do que uma exaustiva exposição de estudos de autores de segmentos diversos, o texto procura transmitir a visão e a experiência adquirida pelo próprio autor no decorrer deste trabalho, de forma simples, concisa e precisa, a públicos com diferentes formações académicas. Procurou-se possibilitar uma leitura independente e fluida deste assunto contemporâneo e multidisciplinar.

Deste modo, o documento está organizado em cinco capítulos. O presente capítulo expõe a temática em estudo, seu enquadramento e os principais objetivos do trabalho. Os capítulos dois, três e quatro são compostos por introdução, desenvolvimento e considerações gerais sobre a matéria discutida em cada um deles. Pretende-se, com isso, facilitar a consulta do documento de uma forma autónoma. A seguir, descreve-se sucintamente cada um destes capítulos:

- O capítulo dois explora a relação entre o desenvolvimento sustentável e o uso de energia em edifícios, apontando motivos e estratégias para reabilitação energética. Parte da análise dos principais relatórios que debatem o impacto das atividades humanas nas mudanças climáticas, destacando a participação do setor de edifícios no consumo de recursos. De seguida, analisa as políticas para este setor, focando-se nas estratégias e na troca de experiências promovidas pela União Europeia. Neste contexto, são elencados instrumentos para remoção de barreiras ao uso de energias renováveis em edifícios. A regulamentação estabelecida, bem como seus desdobramentos ilustram a efetiva implementação de diretivas europeias que influem direta ou indiretamente na eficiência energética e no uso de energias renováveis em edifícios. São também apresentados estudos relevantes que contribuem para a aprendizagem e norteiam futuras ações, no âmbito da rentabilidade da reabilitação energética de edifícios.
- O capítulo três apresenta as abordagens metodológicas empregues neste trabalho, bem como conceitos e premissas adotadas. É proposta uma sequência de fases para solução do problema de otimização da rentabilidade de medidas. Também são apresentados procedimentos, sistemas e recursos em computação para pré-seleção de soluções e simulação de combinações de medidas, dando implementação ao método e oferecendo algumas possibilidades de aplicação para o uso de diferentes intervenientes. Adicionalmente, são discutidas oportunidades de melhoria na abordagem da Comissão Europeia, sugerindo a inclusão de critérios de avaliação do investimento para que a perspectiva financeira reflita de forma concreta o interesse dos proprietários de edifícios.

- O capítulo quatro apresenta três casos de estudo onde são aplicadas as abordagens metodológicas propostas, sempre em contraponto da metodologia recomendada pela Comissão Europeia, analisando resultados baseados em consumos energéticos e valores reais do mercado português para medidas consideradas adequadas à reabilitação energética. O capítulo tem assim o propósito de fornecer uma amostra da aplicação do método proposto a edifícios teóricos e reais, unifamiliares e multifamiliares, de diferentes épocas de construção, inclusive em cenários onde as características históricas impõem restrições às intervenções. Um dos estudos apresenta as perceções de moradores sobre a utilidade da reabilitação energética de edifícios, fornecendo uma visão do aspeto social que envolve o tema.
- Finalmente, o capítulo cinco procura resumir os conhecimentos adquiridos no decurso deste trabalho, apresentando algumas recomendações para o fomento da eficiência energética e do uso de fontes de energia renováveis em edifícios, além de apresentar sugestões de trabalhos futuros.

***CAPÍTULO 2 - MOTIVOS E ESTRATÉGIAS PARA
REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE
EDIFÍCIOS***

2 MOTIVOS E ESTRATÉGIAS PARA REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

2.1 Introdução

O ser humano impôs, a si próprio, padrões de conforto e requisitos que agora são considerados básicos, mas que simplesmente não existiam há poucas décadas. A satisfação destas necessidades o obriga a continuar na senda do desenvolvimento económico. Mas, o ser humano não pode exaurir os recursos naturais do planeta, ao trilhar o seu caminho.

O desenvolvimento é como uma máquina que nunca para de funcionar, permanecendo em movimento constante. No entanto, não se trata de um moto-contínuo, pois é necessária energia para garantir este movimento, a qual não se cria a partir do nada. O princípio da conservação diz que a energia não pode ser criada nem destruída, pode apenas transformar-se.

Ocorre que a maior parte da energia que atualmente movimenta a sociedade é esgotável. A matriz energética mundial ainda está concentrada em combustíveis fósseis, os quais não se renovam no ciclo de vida humano. Portanto, a necessidade de redução do consumo de energia não renovável está na base de um desenvolvimento que se possa considerar sustentável.

A recente disseminação do conceito de sustentabilidade denota essa busca do equilíbrio entre a exploração dos recursos naturais e a preservação da capacidade de suprimento às gerações futuras. O desenvolvimento satisfaz as necessidades do ser humano e o compromisso com a sustentabilidade garante de renovação dos recursos. O desenvolvimento sustentável é possível, desde que se consiga integrar o crescimento económico com o equilíbrio ambiental e com a equidade social, conforme demonstrado na Figura 2.1 [1].

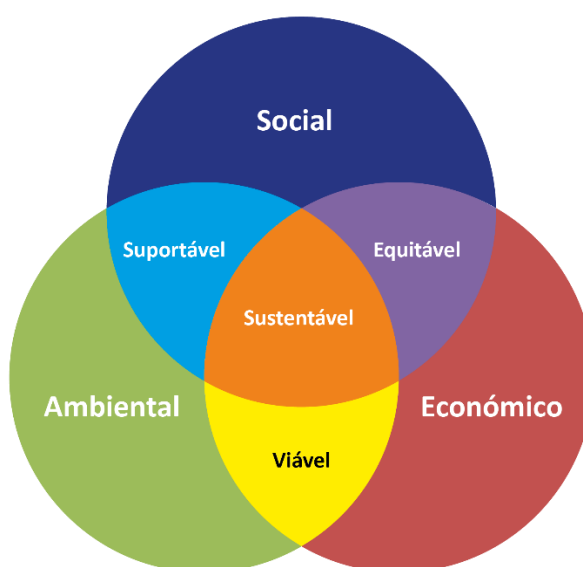


Figura 2.1. Os três pilares do desenvolvimento sustentável (fonte: Brundtland [1]).

Houve uma grande evolução da importância atribuída às questões ambientais, nos últimos sessenta anos. Nos anos 50, a preocupação com o meio ambiente estava praticamente restrita à comunidade científica, mas, nos anos 60 estendeu-se às Organizações Não Governamentais (ONG). Nos anos 70, os debates alcançaram o cenário político e, nos anos 80, atingiram os agentes económicos. Nos anos 90 surgiu uma preocupação global com o ambientalismo, abrangendo os principais setores da sociedade. No novo milénio, o desenvolvimento sustentável é disseminado nas escolas e são assinados acordos internacionais abrangentes e relevantes, o que serve de alento e motivo de esperança para as futuras gerações.

Criado em 1988, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) tem o objetivo de estudar fenómenos ligados às mudanças climáticas e orientar formadores de políticas. O painel congrega 2,5 mil proeminentes cientistas de mais de 130 países. De acordo com o Relatório Especial sobre Energias Renováveis e Mitigação de Mudanças do Clima (SRREN), divulgado pelo IPCC [3], há 95% de certeza científica que as alterações climáticas vêm sendo causadas por atividades humanas. Pode-se afirmar que a manutenção do cenário atual de emissões BAU (*business as usual* - negócio como de costume), ocasionará concentrações de gases com efeito estufa (GEE) e aumento das temperaturas globais, pondo em risco a vida no planeta. Na ausência de ações, a quantidade de GEE na atmosfera poderia mais que triplicar até o final deste século.

O relatório do economista Nicholas Stern [2], encomendado pelo governo britânico e lançado em 2006, afirmava que, com um investimento de apenas 1% do PIB (Produto Interno Bruto) mundial, se pode evitar a perda de 20% do mesmo PIB, em simulação de um prazo de 50 anos. Estes investimentos são estimados para níveis de estabilização entre 500-550ppm CO₂ e não serão uniformemente sentidos nos diferentes setores (indústria, transporte, construção etc.). Alguns setores intensivos em carbono sofrerão enquanto, para outros, as políticas voltadas às mudanças climáticas irão criar oportunidades.

A Agência Internacional de Energia (IEA) tem feito um trabalho detalhado com base em seus modelos globais (ACT MAP), sobre a viabilidade tecnológica e económica de reduzir as emissões do nível atual e, ao mesmo tempo, cumprir outras metas de política energética [21] [22]. Esses e outros estudos fazem diferentes suposições sobre a quantidade de redução de emissões de GEE a ser alcançada, e a combinação exata de tecnologias e medidas de eficiência utilizadas para se atingir este objetivo. Mas, todos concordam que a eficiência energética e o uso de fontes de energia renováveis (FER) irão tornar-se uma parte muito significativa do total. Eficiência energética é a otimização do consumo de energia e FER são energias primárias inesgotáveis, considerado o ciclo de vida do ser humano.

A Figura 2.2 apresenta uma compilação realizada por Dennis Anderson para o relatório Stern [4], onde as barras mostram os resultados dos referidos relatórios internacionais. Desta forma, é possível observar a composição das reduções de emissões obtidas em diferentes modelos. São considerados cenários com fraca participação de energia nuclear e FER. Também se considera a influência de captura e armazenamento geológico de carbono (CCS) e de equipamentos

domésticos que combinam produção de calor e eletricidade (dCHP). O trabalho do IPCC diz respeito à redução de emissões até 2020, enquanto os outros se relacionam com redução de emissões até 2050. Separadamente, o IPCC também estima poupanças plausíveis de emissões de setores não energéticos.

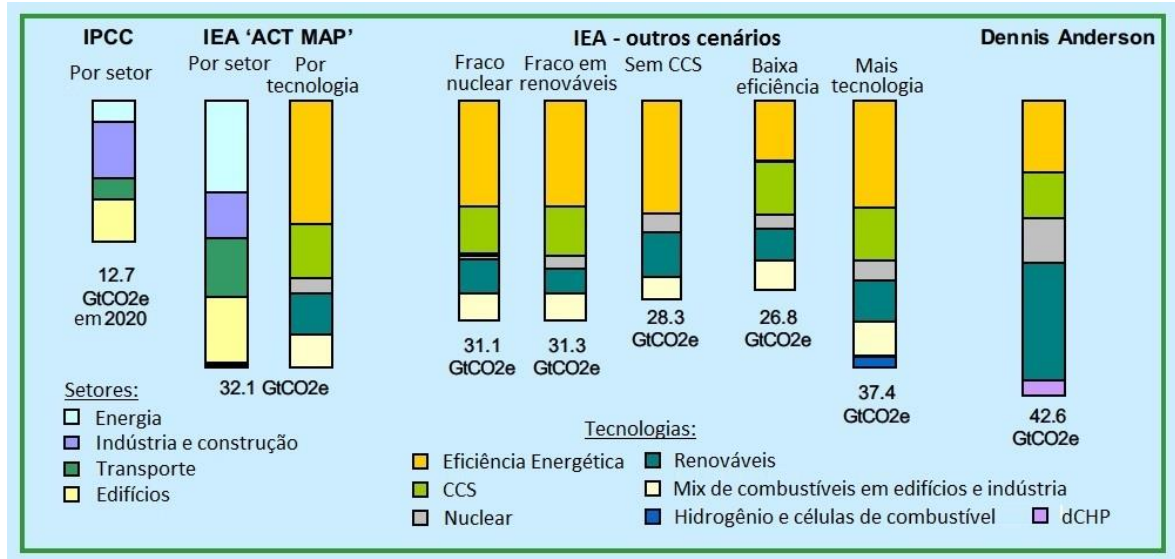


Figura 2.2. Fontes de combustíveis fósseis relacionadas com redução de emissões em 2050 (fonte: Stern [2]).

A estabilização das concentrações de GEE exigirá cortes profundos das emissões, de pelo menos 25%, até 2050. O valor do investimento para alcançar este objetivo vai depender de certo número de fatores e, particularmente, de progredir na redução dos custos de tecnologias baseadas em FER. Se, até 2050, estas tecnologias alcançarem uma participação superior a 50% na produção de energia primária do mundo, será possível conter o aquecimento global [4]. Isto faz com que seja essencial que as nações concordem em reduzir suas emissões de GEE e que se ponham no rumo de uma economia de baixo carbono. Na Figura 2.3, é possível observar o aumento gradual da participação das diversas tecnologias FER na redução de emissões, ao mesmo tempo em que diminui a influência proporcional da eficiência energética.

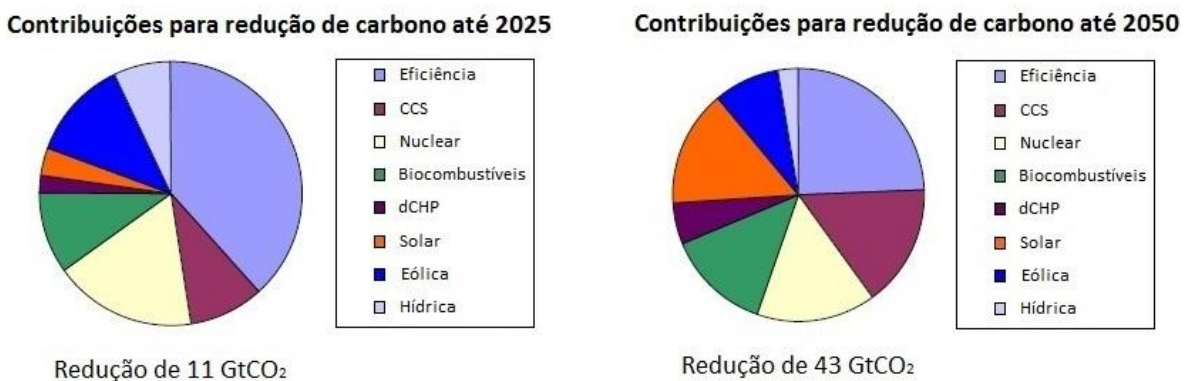


Figura 2.3. Distribuição da redução de emissões por tecnologia (fonte: Stern [2]).

Comparando-se os custos e benefícios, demonstra-se claramente as vantagens de uma ação rápida e forte sobre as alterações climáticas causadas pela atividade humana. As metas para redução de GEE têm ocupado o primeiro plano nos encontros de chefes de governo, pois estes já perceberam que ignorar as mudanças climáticas acabará por prejudicar o crescimento económico. O combate às alterações climáticas é uma estratégia pró-crescimento e não faz qualquer sentido permanecer no cenário BAU, principalmente porque já existe conhecimento científico e tecnológico que permite reduzir impactos ambientais, sem prejudicar o desenvolvimento económico [2].

Recentemente, países que até então se mostravam reticentes em assumir publicamente metas para redução de GEE, mudaram sua postura, em grande parte graças a pressões internacionais. No final de 2014, os presidentes dos Estados Unidos e da China anunciaram compromissos concretos para diminuição das emissões. Os EUA comprometeram-se a reduzir as emissões de GEE entre 26% e 28% em relação aos níveis de 2005, até 2025. A China responsabilizou-se por alcançar o máximo de emissões em 2030, com a tentativa de atingir esse teto antes. Em agosto de 2015 os EUA anunciaram um plano para reduzir 32% das emissões de carbono das centrais termoelétricas em 2030, face aos níveis de 2005. As centrais deverão aumentar de 22 para 28% a parcela de FER empregue na produção de eletricidade. Espera-se que estes e outros acordos sejam formalizados em Paris, na 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas, da Organização das Nações Unidas.

Na União Europeia (UE), a agenda ambiental já é prioridade. A cooperação entre os Estados-Membros visando o aumento da eficiência energética, a promoção do uso de FER e a consequente redução de emissões de GEE tem vindo a ser reforçada por intermédio da troca de experiências e melhores práticas. O alcance de um novo patamar para o desenvolvimento é premente, principalmente porque as fragilidades da Europa em termos de segurança energética são notórias. Há uma crescente dificuldade em obter acesso a novas reservas de petróleo e gás, um declínio acentuado da produção e uma tendência crescente de nacionalização dos recursos, cenário em que a energia é utilizada como arma no debate político e estratégico.

Com a volatilidade no preço do petróleo e do gás e seu impacto nos preços da energia, a eficiência energética e o uso de FER assumem participação determinante em todas as iniciativas que buscam atenuar o problema da (in)segurança energética. As ações estratégicas passam pela redução da dependência, a criação de um modelo energético descentralizado, a diversificação das fontes de abastecimento e a redução da intensidade energética.

A intensidade energética é calculada pelo valor global da energia consumida num determinado país, dividida pelo seu produto interno bruto. Assim, uma elevada intensidade reflete um alto custo de conversão de energia em produção. Já o índice de dependência energética (*DE*) mede o peso do défice da balança energética sobre os consumos em terra, mar e ar, ao longo de um ano, sendo calculado conforme a seguinte expressão:

$$DE = \left(\frac{I - E}{CEP - NMI} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

onde, I representa importações, E as exportações, CEP o consumo de energia primária e NMI a navegação marítima internacional, todos em euros [€].

O investimento realizado pela UE em eficiência energética e no uso de FER tem contribuído para que a dependência energética dos Estados-Membros diminua. Em Portugal, no ano de 2014, houve uma queda de 2,3% no consumo de energia final, com conseqüente redução de 4,7% no consumo de energia primária, em parte também ocasionada pelo aumento de 11% da produção hidroelétrica, segundo a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) [14]. Há que destacar a redução de cerca de 10% no consumo de energia primária no petróleo e 7,5% no gás natural, resultante da diminuição de consumo no setor energético. A redução total de 9% no saldo importador dos produtos energéticos, relativamente a 2013, foi determinante para que a dependência energética diminuísse para 71%, o que representa uma forte descida de 17,8 pontos percentuais face a 2005, conforme pode ser observado na Figura 2.4. Desde 1995, Portugal não registava um nível de dependência energética tão reduzido.

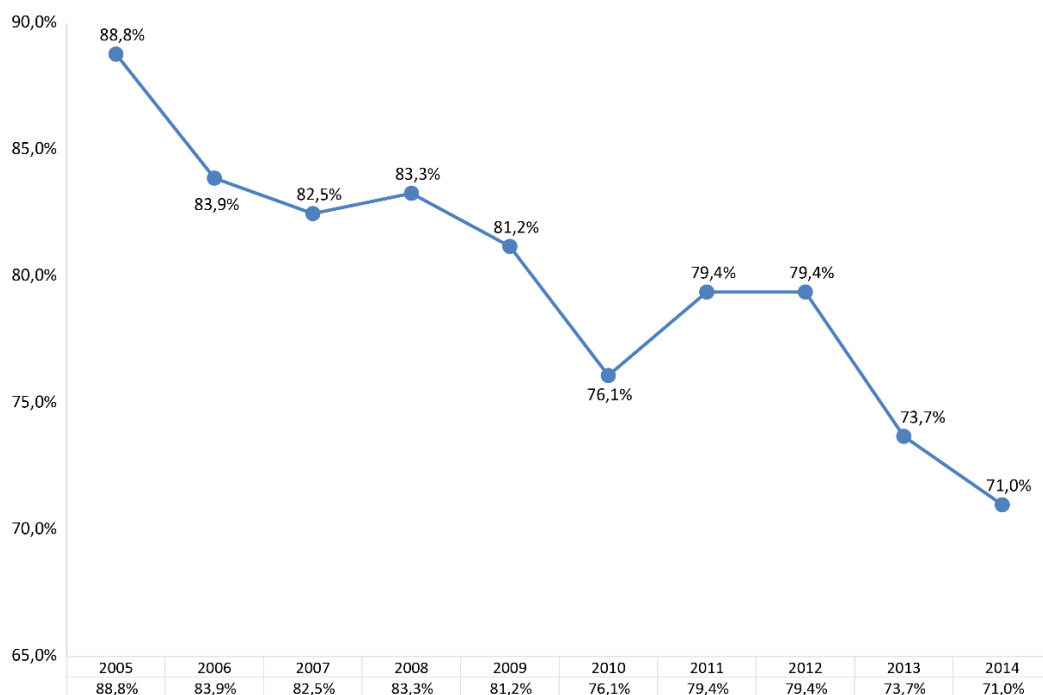


Figura 2.4. Dependência Energética 2005–2014 (fonte: DGEG [14]).

Grande parte da mudança neste cenário deve-se ao investimento que Portugal tem feito em FER. Em que pesem as variações meteorológicas que condicionam a capacidade de produção de energia hídrica e eólica, a crescente capacidade instalada para produção de energia a partir de fontes renováveis tem vindo a ganhar peso relativo. De uma dependência quase total, em menos de 10 anos, Portugal adquiriu capacidade de produção interna que pode fornecer pelo menos 30% das necessidades energéticas nacionais.

Portugal apresenta hoje uma intensidade energética da energia primária em linha com a UE, mas este valor oculta um resultado menos positivo quando medida a intensidade energética da energia final. Na realidade, o elevado investimento feito por Portugal em energias renováveis e o reduzido consumo energético no setor residencial, comparativamente com o resto da Europa, encobrem uma intensidade energética da economia produtiva, 27% superior à média da União Europeia [15].

A preocupação com a segurança energética e os indicadores de dependência e intensidade energética só vêm confirmar a capacidade que as energias renováveis têm de influenciar o cenário geopolítico. De acordo com o Relatório Especial sobre Energias Renováveis e Mitigação de Mudanças do Clima (SRREN) [3], as energias renováveis também são as que têm maior potencial e melhor custo para lidar com as mudanças climáticas. Isso porque não há limitações técnicas ou escassez de potencial no mundo, mas sim uma série de barreiras políticas e económicas que precisam ser modificadas para que se invista mais nas energias limpas.

Portanto, se FER contribuem substancialmente para diminuição da dependência energética e para mitigação das mudanças climáticas, várias formas de apoio económico, bem como políticas para criar um ambiente favorável serão necessárias. Estas políticas podem ser promulgadas em todos os níveis de governo (local, regional, nacional e internacional) e vão desde o apoio à investigação até o desenvolvimento de tecnologias baseadas em FER, para produção de energia térmica ou eletricidade [3].

Mesmo com as barreiras políticas e económicas ainda existentes, o quadro mundial das energias renováveis e sua possibilidade de expansão são vistos com otimismo pelos investigadores. É grande a tendência de crescimento das renováveis, na medida em que se vão reduzindo as barreiras e obtendo conhecimento através de investigação e desenvolvimento de tecnologia nesta área. Com poucos incentivos, já contamos com quase 13% de energias renováveis no suprimento de energia primária do mundo (ver Figura 2.5), sendo possível estimar que esse número venha a crescer nos próximos anos.

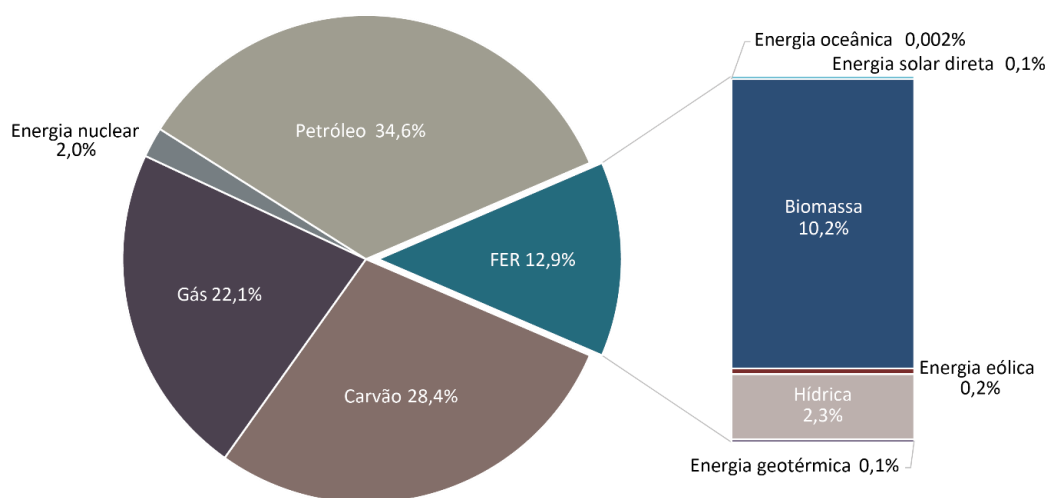


Figura 2.5. Contributo das fontes de energia no abastecimento global (fonte: SRREN [3]).

Embora as energias renováveis tenham esta representatividade no abastecimento global, mais de 10% são ainda provenientes do uso tradicional da biomassa (em cozinhas para aquecimento, nos países em desenvolvimento). As hidroelétricas representam 2,3% e as outras renováveis somam 0,4%. Uma combinação de tecnologias, juntamente com avanços em eficiência, são necessários para trilhar o caminho de crescimento de FER.

Algumas tecnologias FER já são amplamente competitivas, comparando-se com os preços atuais do mercado de energia. E, de entre as tecnologias FER que ainda não são competitivas, muitas podem fornecer energia com rentabilidade satisfatória, em circunstâncias onde há incentivos ao investimento privado, cujo montante mais significativo provém de empresas.

No entanto, existem duas falhas de mercado que, em separado, criam a justificativa para o apoio adicional a tecnologias inovadoras e que tenham alto potencial de desenvolvimento tecnológico. A primeira falha do mercado refere-se ao custo externo das emissões de GEE: na maioria das vezes, quem polui não paga pela sua ação, recaindo este custo sobre toda a sociedade. A segunda falha de mercado está no campo da inovação: se as empresas subestimam os benefícios futuros dos investimentos em desenvolvimento de tecnologias de FER ou se elas não se podem apropriar desses benefícios, vão investir menos do que o ideal, do ponto de vista macroeconómico [3].

Para combater estas falhas de mercado, a UE implementou o Regime de Comércio de Licenças de Emissão da UE (RCLE-UE), em 2005. Os objetivos principais são a redução das emissões industriais de GEE de uma forma harmonizada e eficaz, em termos da correta apropriação de custos, e a vinculação dos investimentos hipocarbónicos (onde se incluem os investimentos em FER) à sua luta contra as alterações climáticas. Segundo o regime, as empresas podem comprar ou vender licenças de emissão. Cada licença dá ao seu detentor o direito de emitir o equivalente a uma tonelada de CO₂. As empresas que investem na inovação ecológica podem comercializar ou utilizar elas mesmas os chamados créditos de carbono. Mas, para que a iniciativa funcione, estas autorizações deveriam atingir um preço que encorajasse as empresas a consumir menos energia e a emitir menos gases com efeito estufa, o que não acontece atualmente. Existe um desequilíbrio entre a oferta e a procura de licenças de emissão, o qual prejudica, entre outros, os incentivos ao investimento em FER.

As licenças estão muito baratas porque a procura caiu e a oferta continua constante. Em 2013, havia um excesso de 2 mil milhões de licenças, número que pode crescer até 2,6 mil milhões, em 2020. Um excesso de oferta reduz os incentivos nos investimentos ecológicos e a eficácia do RCLE-UE no combate às alterações climáticas. Para resolver este impasse, a UE trabalha na criação de uma “reserva de estabilidade do mercado”. Sempre que o excedente atingir um determinado valor, são retiradas licenças e colocadas numa reserva para evitar desequilíbrios no mercado. Se necessário, as licenças na reserva podem ser novamente colocadas no mercado [23]. Mas, mesmo que ocorra a desejável estabilização do RCLE-UE, outros instrumentos serão necessários no longo caminho ainda a ser percorrido, para eliminação destas falhas de mercado.

2.2 Edifícios e o uso de energia

A taxa de urbanização tem vindo a crescer em todo o mundo, sendo que a opção de viver em centros urbanos já atingiu mais de 50% da população mundial. O metabolismo das cidades e a forma como evoluem são fatores determinantes a serem considerados nos objetivos de um desenvolvimento sustentável. A interação entre os edifícios, a sua área circundante e o meio ambiente envolve fatores complexos que impactam a sustentabilidade e, portanto, devem ser plenamente compreendidos.

Os critérios de sustentabilidade na construção devem ser aplicados em todos os níveis e estar relacionados com os diferentes estágios da existência dos edifícios. A Figura 2.6 apresenta o ciclo de vida de um edifício, com quatro fases que se relacionam entre si e com o meio exterior.

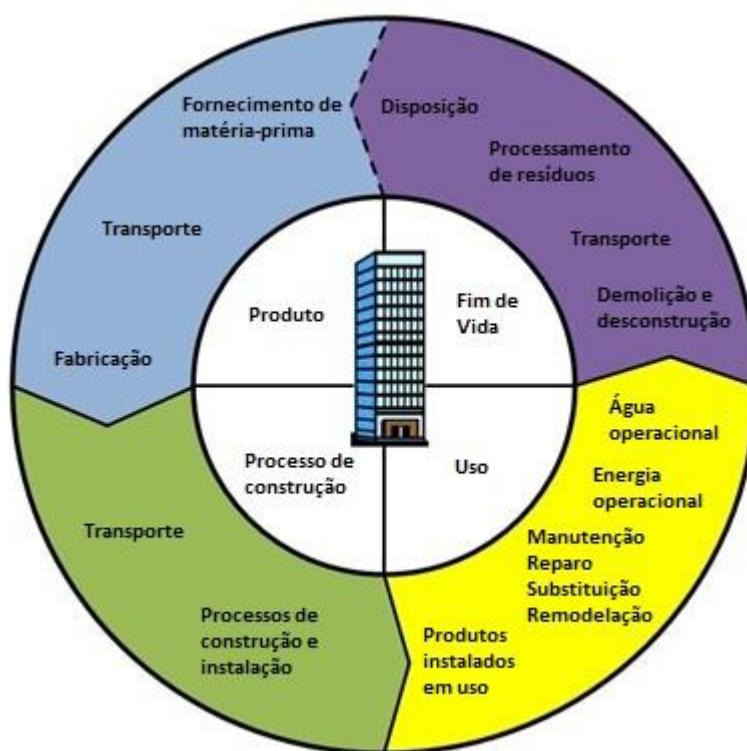


Figura 2.6. Ciclo de vida de um edifício (fonte: EN ISO 15978:2011 [24]).

A fase de conceção do produto e projeto consiste num importante processo que pode minimizar o impacto ambiental provocado pelo edifício, a partir do conhecimento sobre materiais e métodos que melhor se adequam à construção sustentável. As experiências adquiridas permitem desenvolver novas técnicas construtivas que privilegiem a harmonia entre a construção e o meio ambiente. A atividade de registo e documentação do desenvolvimento do projeto é um fator fundamental para a aprendizagem.

A fase de construção é uma das mais relevantes no consumo de materiais e energia. Nesta fase, a eficiência e a excelência na execução são preponderantes. A fiel implementação do que foi planeado na fase de projeto, aliada a certa adaptabilidade em relação aos percalços que podem ocorrer sua execução, faz com que a experiência dos profissionais envolvidos desempenhe um papel essencial.

A fase de uso envolve o consumo de energia e materiais por um longo período. A forma como um edifício é utilizado e como a sua estrutura e sistemas são conservados e renovados determinam o gasto de energia e a geração de resíduos resultantes da sua atividade. Cada edifício é ocupado por diferentes pessoas e os padrões de uso variam constantemente, sendo, por vezes, pouco previsível o consumo de recursos. Apesar disso, a fase de uso tem sido apontada como o período de maior contributo para o consumo de energia e também para os impactos ambientais associados ao ciclo de vida dos edifícios ([25], [26], [27]).

O fim de vida consiste na demolição ou desconstrução e, idealmente, deve contar com estratégias definidas ainda na fase de projeto. Estas estratégias contemplam três etapas fundamentais: a desmontagem, a reutilização e a decomposição. A desmontagem consiste em prever a possibilidade de separação de partes do edifício para reutilização. A reutilização em si implica a criação de novos produtos a partir dos utilizados anteriormente. A redução dos componentes tóxicos e resíduos gerados pela demolição do edifício diminui os custos de deposição dos materiais não renováveis, devido à necessidade de atender restrições relacionadas com a preservação do meio ambiente.

Numa sociedade cada vez mais preocupada com a sustentabilidade, é fundamental uma gestão mais eficiente dos recursos e dos custos relacionados com as quatro fases do ciclo de vida do edifício, sendo a fase de uso a mais relevante [28]. De entre os gastos inerentes à fase de uso, os custos com energia são os que certamente mais condicionam o desempenho económico dos edifícios. Estes custos podem ser influenciados por um vasto conjunto de variáveis e uma delas é o comportamento térmico de edifícios. Os países com climas particularmente frios ou quentes tendem a ter um maior consumo de energia em aquecimento ou arrefecimento, nas suas habitações e locais de trabalho.

Tal como referido anteriormente, em 2010, os edifícios da UE representavam 41% do consumo de energia final, dos quais 14% eram relativos ao setor terciário e 27% relativos às habitações (o que representa cerca de 2/3 do consumo total de energia em edifícios) [7]. Portugal apresenta números bastante inferiores à média europeia. No mesmo ano, o setor de serviços contribuiu para 12% do consumo português de energia final. As habitações portuguesas contribuíram para 17,7% deste consumo e cerca de 30% do consumo total de eletricidade no país [17].

É importante perceber como se dá a evolução do consumo de energia e os fatores que a influenciam. No final de 2009, ocorreu um declínio perceptível no consumo de energia final em todos os setores da economia. Esta queda poderia ter sido atribuída à implementação de diretivas mais restritivas ([29], [30], [31]). No entanto, a regulamentação não pode ser encarada

como a única responsável pela redução no consumo, já que raramente apresenta resultados no curto prazo. Posteriormente, a queda no consumo de energia final ocorrida em 2009 foi atribuída aos efeitos da crise financeira (iniciada em 2007) e a uma substancial redução de atividades no setor da construção civil. Independente disso, pode ocorrer uma retoma no consumo, mesmo num cenário de recessão, como refletem os dados de 2010 (ver Figura 2.7).

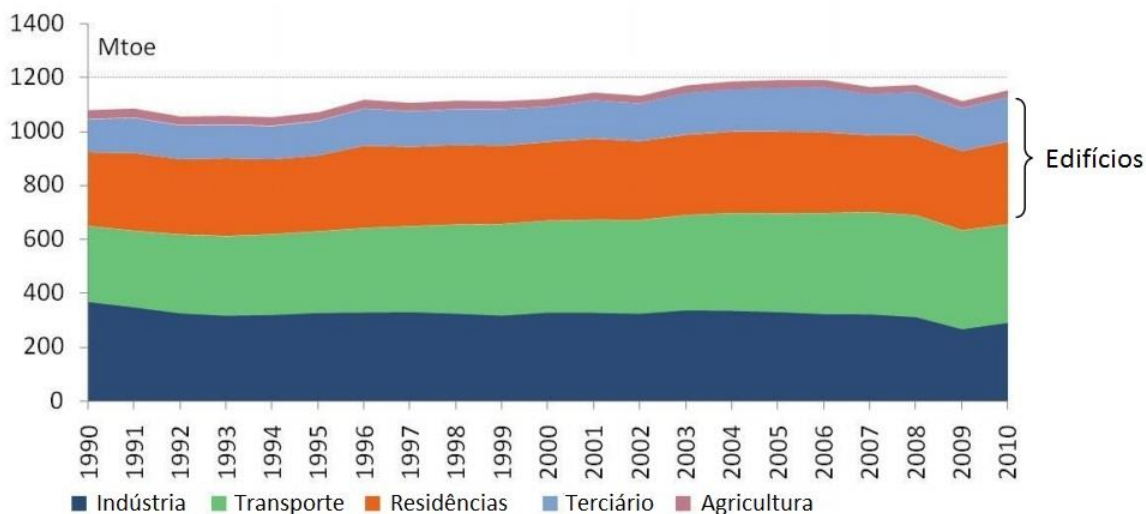


Figura 2.7. Consumo de energia final por setor na UE-27 (fonte: ADEME [7]).

Também é importante compreender como um elevado consumo de energia final nos edifícios impacta na exaustão dos recursos naturais. Este impacto está diretamente relacionado com o caminho que a energia percorre e também com a sua origem. Existem diferentes processos para produção, transformação, transporte e distribuição, até a efetiva utilização da energia nos edifícios. No âmbito do presente trabalho, é oportuna a apresentação, mesmo que sucinta, de conceitos necessários ao entendimento do processo de transformação da energia.

As formas de energia podem ser resumidas em três: primária, final e útil. Por se tratar da forma comercial da energia, a final é apresentada em primeiro lugar. É a energia medida nos contadores e sua unidade física depende do tipo de energia, por exemplo: quilowatt-hora [kWh] para eletricidade, metros cúbicos [m³] para gás natural, quilogramas [kg] para *pellets*, litros [l] para gasóleo etc. Toda energia final já sofreu processos de transformação até ser utilizada em equipamentos. Assim, a energia final situa-se entre a energia primária e a energia útil.

A energia final resulta de todas as degradações e perdas associadas aos processos de transformação, transporte e distribuição, ocorridos após a produção da energia primária. Estas degradações podem ter várias origens e fazem com que a energia primária seja sempre superior à energia final. A energia primária é a verdadeira fonte energética e pode ser de origem renovável, fóssil, mineral ou extraída de resíduos. Decorre dos recursos energéticos que se encontram disponíveis na natureza (energia solar, hídrica, eólica, biomassa, petróleo, gás natural). Habitualmente expressa em termos da massa equivalente de petróleo (quilograma

[kgep] ou tonelada [tep]), a energia primária é também contabilizada em quilowatt-hora [kWh_{EP}].

Normalmente também expressa em quilowatt-hora [kWh], a energia útil nem sempre é inferior à energia final, uma vez que está dependente do princípio de funcionamento e eficiência dos equipamentos que utilizam a energia final. Por exemplo, sendo a luz produzida por uma lâmpada incandescente uma forma energia útil, seu valor é bastante inferior ao da energia final necessária, tendo em conta que o processo de conversão da eletricidade em luz é pouco eficiente. No entanto, no caso de uma bomba de calor, a energia útil produzida é superior à energia final a montante, graças à sua elevada eficiência.

Mesmo que a fase de uso seja considerada a mais relevante em termos de consumo energético e, conseqüentemente, a que provoca maiores impactos ambientais, deve-se admitir que é também empregue muita energia na fase de construção do edifício. Quando é contabilizada a chamada energia incorporada no edifício, ou seja, toda a energia necessária à produção, transporte, aplicação, manutenção e descarte dos materiais utilizados nos elementos constituintes do edificado, o impacto ambiental associado ao processo construtivo é bastante significativo [32].

Este enorme gasto com energia e materiais faz com que a renovação do ciclo de vida dos edifícios seja desejável, tanto na perspectiva financeira como na macroeconómica, na medida em que evita impactos ambientais e de altos custos associados a uma nova construção que venha a substituir a edificação existente. Neste contexto, surgem as iniciativas de reabilitação que, embora sejam processos lentos, são imprescindíveis para que tenha lugar a adaptação que garantirá a desejável extensão da vida útil dos edifícios.

Normalmente, a reabilitação edifícios não se dá através de estratégias isoladas ou pontuais, mas sim por intermédio de ações coordenadas nos vários níveis de governação e que visam a revitalização de regiões e suas respetivas áreas circundantes. São intervenções que contemplam os núcleos urbanos como um todo, considerando não só condicionalismos inerentes às diferentes áreas urbanas, mas também o enorme potencial económico [33].

Cerca de um quarto do parque imobiliário existente na Europa foi construído em meados do século passado, registando uma idade superior àquela definida como vida útil teórica que, em países europeus, é normalmente de 50 a 60 anos [34]. Grande parte desses edifícios, muitas vezes valorizados pela sua importância cultural, arquitetónica e até mesmo histórica, apresentam baixo desempenho energético.

Muitos edifícios antigos encontram-se degradados e necessitam de intervenções de reabilitação. Um número significativo destes edifícios continua a usar sistemas convencionais ineficientes, tipicamente associados a altos custos de energia e a maiores emissões de CO₂. Intervenções construtivas para dotar estes edifícios de melhores condições de eficiência, podem propiciar uma significativa economia de energia.

Em Portugal, a legislação existente preconiza que estes devam passar a cumprir requisitos mínimos de desempenho energético, caso sejam submetidos a uma grande intervenção de reabilitação. As grandes renovações de edifícios são uma oportunidade para tomar medidas rentáveis de melhoria do desempenho energético.

No âmbito português, a reabilitação do edificado representa apenas cerca de 6,5 % do total da atividade do setor da construção, abaixo da média europeia, situada nos 37 %. De acordo com os recentes dados nacionais de recenseamento da população e habitação, Censos 2011, existem cerca de dois milhões de imóveis a necessitar de recuperação, o que representa cerca de 34% do parque habitacional português, um enorme potencial para reabilitação energética de edifícios [35]. Deste modo, atuar na reabilitação dos edifícios não é só uma necessidade atual, como também deve fazer parte de uma agenda permanente, onde a constante melhoria do desempenho energético dos edifícios existentes contribuirá para a economia de energia e, conseqüente, para a preservação do meio ambiente, ao longo de gerações.

2.3 Políticas para o setor de edifícios

Um crescente número de políticas têm impulsionado as medidas de promoção da eficiência energética e do uso de tecnologias baseadas em FER em edifícios, nos últimos anos. No entanto, ainda persiste uma série de barreiras que impedem que os investimentos nesta área se tornem massivos. A Tabela 2.1 apresenta algumas das principais barreiras e potenciais instrumentos políticos para sua remoção.

Tabela 2.1. Barreiras de mercado e instrumentos para sua remoção (fonte: IPCC [3]).

<i>Tipo de barreira</i>	<i>Potenciais instrumentos políticos</i>
Falhas de mercado e barreiras económicas	Impostos sobre carbono, esquemas de comércio de emissões, apoio público para investigação e desenvolvimento, criação de ambiente económico que apoie o investimento, microcrédito
Desinformação e falta de consciencialização	Regulamentação, treinamento técnico, campanhas informativas
Barreiras institucionais e políticas	Criação de ambiente propício para a inovação, revisão de regulamentos técnicos, apoio internacional para transferência de tecnologia, liberalização das indústrias de energia

No que diz respeito às duas principais falhas de mercado, nomeadamente o custo externo das emissões de GEE a falta de garantias em relação aos benefícios da inovação, o seu impacto no setor de edifícios é indireto. O Regime de Comércio de Licenças de Emissão da UE (RCLE-UE) é dirigido principalmente as empresas, apesar de que alguns benefícios oriundos de projetos de inovação ecológica possam recair sobre o setor de edifícios, nomeadamente os que incluem FER.

Políticas promulgadas especificamente para promover eficiência energética e o uso de FER são variadas e incluem medidas que podem ser aplicadas em praticamente todos os tipos de edifícios. Estas políticas incluem incentivos fiscais (pagamentos à produção de energia, créditos, descontos, doações, reduções e isenções de impostos); financiamento público (investimentos, garantias, empréstimos, contratos públicos); e regulamentação (tarifa-prémio, obrigações de uso, etiquetagem verde e compra de energia verde) [3].

Incentivos que subsidiam a produção de energia são geralmente preferíveis aos subsídios ao investimento, porque eles promovem o resultado desejado de geração de energia. No entanto, as políticas devem ser adaptadas às tecnologias específicas e respetivos estágios de maturação. Os subsídios ao investimento podem ser úteis quando uma tecnologia ainda é relativamente cara ou aplicada em pequena escala (por exemplo, pequenos sistemas solares). Nestes casos, a concessão de subsídios deve estar associada a padrões de tecnologia e certificação para assegurar requisitos mínimos de qualidade de sistemas e instalação [3].

Mecanismos de financiamento público em projetos de eficiência energética e/ou de FER têm duplo objetivo: atuar diretamente ou alavancar investimento privado e, indiretamente, criar ganho de escala e mercados comercialmente sustentáveis para essas tecnologias.

Há uma vasta literatura avaliando políticas com foco no uso de FER, sob critérios de eficácia e eficiência. Muito se tem discutido, mas políticas concretas tardam a ser implementadas ou, muitas vezes, não apresentam resultados satisfatórios. De entre as que se mostram mais efetivas, destacam-se as políticas voltadas para o uso de FER na produção de eletricidade e energia térmica, para aquecimento ou arrefecimento em edifícios.

- Políticas para Eletricidade

Uma série de estudos, incluindo alguns realizados para a Comissão Europeia, concluíram que tarifas-prémio (FIT) "bem desenhadas" e "bem implementadas" têm sido as políticas de promoção de eletricidade proveniente de FER mais eficientes (em comparação do apoio total recebido com o custo de produção) e eficazes (capacidade de oferecer um aumento na parcela de eletricidade de FER consumida). Tarifa-prémio (ou regime bonificado) é um instrumento destinado a acelerar o investimento em tecnologias de energias renováveis.

Este instrumento obtém resultado através da oferta de contratos de longo prazo para os micro e miniprodutores de energias renováveis, normalmente com base no custo de geração de cada tecnologia. Ao invés de pagar um montante igual por energia gerada, tecnologias como a energia eólica, por exemplo, recebem um preço menor por quilowatt-hora [kWh], enquanto a tecnologias como a energia solar é oferecido um preço mais alto, refletindo custos de produção mais elevados, atualmente.

Uma das principais razões para o sucesso das tarifas-prémio bem implementadas é que costumam garantir elevada segurança do investimento, devido à combinação de pagamentos de longo prazo a preço fixo, conexão e garantia ao acesso à rede para toda a geração. No entanto,

é geralmente insuficiente para estimular o crescimento significativo de tecnologias menos competitivas como painéis fotovoltaicos, pelo menos onde os custos de geração são superiores aos preços de energia cobrados do consumidor final [3].

- Políticas para Aquecimento e Arrefecimento

O foco das políticas de FER está mudando de uma concentração quase que inteiramente em energia elétrica para incluir aquecimento e arrefecimento, sendo que um número crescente de governos está adotando incentivos para avançar nestas tecnologias. Instrumentos, tanto para aquecimento como arrefecimento, necessitam abordar especificamente as características mais heterogêneas dos recursos, incluindo a sua vasta gama de escalas, variação na capacidade de fornecer diferentes níveis de temperatura, procura amplamente distribuída, relação com a carga de calor, a variabilidade de uso, ausência de centrais distritais de fornecimento ou mecanismos de comércio.

A maioria dos instrumentos de apoio têm focado o aquecimento através de FER e incluem incentivos fiscais (como descontos e subsídios, reduções de impostos e créditos), políticas de financiamento público (como empréstimos), regulamentação (como obrigações de uso) e esforços educacionais. Até o momento, os incentivos fiscais têm sido a política prevaiente. A disponibilização de créditos fiscais após a instalação de sistemas de aquecimento FER pode ser logisticamente vantajosa em relação, por exemplo, aos subsídios que exigem pré-aprovação antes da instalação, embora haja pouca experiência com esta opção.

Mecanismos regulatórios, como obrigações de uso e quotas têm atraído maior interesse por seu potencial para incentivar o crescimento de FER para aquecimento, independente dos orçamentos públicos, embora também tenha havido pouca experiência com essas políticas, até o momento.

De forma similar ao uso de FER para produção de eletricidade, as políticas para seu uso em aquecimento e arrefecimento serão mais adequadas para determinadas circunstâncias se, na sua concepção, for considerado o estado de maturidade de cada tecnologia, em particular, dos mercados e das cadeias de abastecimento existentes.

Incentivos à produção, destinados a reduzir os preços oferecidos ao consumidor final, são considerados mais eficazes para aumentar o número de sistemas para aquecimento e arrefecimento, tais como redes distritais urbanas, do que ao investimento em instalações locais de geração, para as quais existem poucos procedimentos de monitorização ou avaliações da relação custo-benefício.

Embora haja alguns exemplos de políticas de apoio às tecnologias para o uso de FER para fins de arrefecimento, as iniciativas visando a implementação de unidades para esta finalidade são consideravelmente menos desenvolvidas do que para aquecimento. A falta de experiência com a implementação de políticas para arrefecimento está, provavelmente, ligada aos níveis iniciais de desenvolvimento destas tecnologias [3].

Para remover as barreiras da desinformação e da falta de consciencialização, um eficiente instrumento é a criação de sistemas de certificação para edifícios novos e existentes, sejam públicos, residenciais ou não residenciais. Estes certificados são destinados à criação de uma base de dados fiável que oriente políticas, estratégias e regulamentação para melhoria do desempenho energético em edifícios. Atinge também a barreira principal-agente (*landlord-tenant*), já que os certificados para edifícios comerciais e residenciais devem ser disponibilizados, quando estes são construídos, vendidos ou alugados. Esta medida facilita o acesso a informações sobre o desempenho energético dos edifícios, durante o relacionamento contratual entre vendedor-comprador ou senhorio-inquilino.

A barreira do principal-agente surge dos diferentes interesses de agentes envolvidos num determinado processo de decisão. Estes interesses podem entrar em conflito, por exemplo, quando intermediários são envolvidos nas decisões de compra de tecnologias que promovem poupanças de energia. Ou ainda, quando os agentes responsáveis pelas decisões de investimento são diferentes daqueles beneficiados pela economia de energia, por exemplo, devido às estruturas organizacionais ou institucionais fragmentadas. Isso limita o papel do consumidor e leva a uma subestimação de investimentos em eficiência energética.

Por exemplo, em edifícios residenciais, os senhorios (proprietários) muitas vezes fornecem os sistemas instalados e decidem sobre a renovação do edifício, enquanto os inquilinos (arrendatários) pagam a fatura de energia. Como resultado, não é provável que o senhorio invista em eficiência energética, uma vez que ele não é o único a receber a recompensa do investimento.

As decisões sobre os recursos energéticos de um edifício (por exemplo, se deve instalar janelas ou iluminação de alta eficiência) são muitas vezes tomadas por agentes que não são responsáveis pelas faturas de energia ou não utilizam o equipamento, dissociando os interesses do construtor/investidor e do ocupante. Por exemplo, em muitos países, as faturas de energia dos hospitais são pagas com fundos públicos centrais, enquanto as despesas de investimento competem à própria instituição ou ao governo local.

Um dos pontos fulcrais nas políticas para melhoria do desempenho energético em edifícios é a baixa taxa de renovação do parque. Na Europa, boa parte das políticas está voltada aos edifícios novos, mas a participação destes é bastante reduzida, de 1 a 2% do parque edificado [36]. Logo, a UE só vai atingir seus objetivos se concentrar esforços nos edifícios existentes.

Neste sentido, de entre os instrumentos em curso, o que exige que a construção seja elevada ao nível de eficiência de novas construções, quando passa por um processo de grande reabilitação, é um das mais importantes [9]. Esta medida é vital para alcance das metas, considerando: o atual reduzido volume de negócios, o lento ciclo de renovação e, ainda, que as grandes reformas de edifícios antigos e ineficientes podem ocorrer várias vezes antes de serem finalmente removidos do estoque. Este instrumento representa um esforço pioneiro em termos de política de eficiência energética, sendo um dos poucos no mundo a atingir edifícios existentes.

A Comissão Europeia tem feito um trabalho notável, facultando um grande volume de informações e relatórios relevantes sobre os benefícios da eficiência energética e do uso de FER em edifícios. Cabe aos Estados-Membros criar estruturas nacionais para interpretar e adaptar eficazmente esta aprendizagem às suas realidades locais, ou delegar esta importante tarefa a instituições já existentes que estejam capacitadas para isso. Mais importante ainda é recolher, tratar e compartilhar suas próprias informações, não só com órgãos que as solicitam, mas principalmente com a sociedade, em formato apropriado.

Este processo deve ser contínuo, no estrito interesse do estabelecimento de políticas, estratégias e regulamentação ajustadas aos contextos nacionais e que estejam em consonância com as diretivas da UE. Políticas, estratégias e regulamentação devem ser periodicamente revisadas, aplicadas e expandidas para que influenciem na redução no consumo de recursos no longo prazo e que atendam os anseios da sociedade.

2.4 Regulamentação e seus desdobramentos

A regulamentação é um importante instrumento na estratégia de implementação de políticas para a eficiência energética e o uso de energias renováveis em edifícios. Na União Europeia, a regulação de condutas dá-se através de diretivas votadas e aprovadas pelo Parlamento Europeu. É um ato legislativo da União Europeia que exige que os Estados-Membros alcancem um determinado resultado, sem ditar os meios para atingir esse resultado. Pode ser distinguida dos regulamentos da União Europeia, os quais não requerem quaisquer medidas de execução, pois são imediatamente aplicáveis. Uma diretiva, normalmente, permite aos Estados-Membros uma certa flexibilidade quanto às regras exatas a serem adotadas.

As diretivas europeias que orientam, de forma direta ou indireta, a reabilitação energética de edifícios são a *Energy Efficiency Directive* (EED) ([29], [37]) a *Renewable Energy Sources Directive* (RES) [31] e a já citada EPBD [9]. Em conjunto, estas diretivas promovem a eficiência energética, o consumo de energia proveniente de fontes renováveis, a melhoria do abastecimento energético e o estímulo económico deste setor dinâmico, no qual a UE é exemplar.

Em Portugal, os instrumentos de planeamento estratégico que transpõem parte das exigências da EED e da RES são o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER). Os referidos planos identificam as metas a atingir, as barreiras existentes, bem como, o potencial de melhoria em matéria de eficiência energética e de incorporação de energia proveniente de fontes renováveis em vários setores de atividade, tendo em conta a realidade portuguesa [15].

O PNAEE (para o período 2013-2016) e o PNAER (para o período 2013-2020) foram revistos no início de 2013. Estes planos passaram a estar integrados, procurando assim estabelecer uma ação coordenada para o alcance dos objetivos, minimizar a necessidade de investimento e aumentar a competitividade de Portugal. A revisão integrada do PNAEE e do PNAER alinha

os respetivos objetivos em função do consumo de energia primária e da contribuição do setor energético para a redução de emissões de GEE.

No âmbito desta revisão, as medidas difíceis de quantificar ou com impacto reduzido foram substituídas por medidas mais promissoras, reforçando-se as medidas existentes de menor custo e maior facilidade de implementação. Foram também criadas ferramentas estratégicas que permitem monitorizar o impacto das medidas implementadas para que estes planos e programas concretizem-se.

Já a EPBD, foi transposta para a legislação portuguesa pelo Decreto-Lei 118/2013 [16]. A transposição não é completa porque esta nova legislação ainda não contemplou os requisitos de rentabilidade ótima definidos no Regulamento Delegado (UE) n.º 244/2012 [10] que serve de complemento à EPBD, cujo intuito é estabelecer uma metodologia comparativa para o cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de componentes e de desempenho energético dos edifícios.

A seguir, são discutidas em maior detalhe a regulamentação e os desdobramentos mais relevantes para o presente trabalho.

2.4.1 Diretiva de Eficiência Energética (EED)

A EED aborda um dos três pilares fundamentais identificados na Estratégia 20-20-20 da UE: o aumento de 20% a eficiência energética, até 2020. A EED estabelece um quadro comum de promoção da eficiência energética na União Europeia, exigindo que os Estados-Membros estabeleçam medidas em todas as fases da cadeia da energia, desde sua transformação e distribuição até ao consumo final. Estas medidas incluem obrigações de eficiência energética, destacando-se o papel exemplar a ser desempenhado pelo setor público e o direito dos consumidores a ter acesso a informações precisas sobre o seu uso de energia. Também entre estas medidas está a promoção da eficiência no aquecimento, arrefecimento e produção de águas quentes em edifícios, inclusive o incentivo à criação de redes urbanas de abastecimento.

Espera-se que a implementação das orientações constantes do Artigo 7º desta diretiva seja responsável por mais da metade das poupanças de energia exigidas. No âmbito das medidas de eficiência energética em Portugal, o PNAEE 2016, prevê uma poupança induzida de 8,2%, ou 1.501 [ktep], um pouco abaixo da meta definida pela União Europeia de 9% de poupança de energia até 2016 [37]. Os contributos na redução dos consumos energéticos estão distribuídos pelos vários setores de atividade: residencial e serviços, transportes, indústria, agricultura, comportamentos e Estado.

No setor residencial e de serviços, o PNAEE integra três programas: Renove Casa & Escritório, Integração de Fontes de Energia Renováveis Térmicas/Solar Térmico e Sistema de Certificação Energética de Edifícios. Segundo a DGEG, trata-se de uma área muito sensível para o sucesso da implementação do PNAEE 2016, uma vez que representou, em 2011, cerca de 28% do consumo de energia final em Portugal, dos quais 16,6% ocorreram no setor residencial e 11,4%

no setor dos serviços. O peso da componente elétrica é muito elevado, sobretudo nos serviços (verificando-se que, em 2011, mais de 73% correspondia a consumos elétricos), sendo também bastante significativo no setor residencial (cerca de 43%, em 2011) [38].

No entanto, face à energia final, a participação de energia poupada [tep] pelas medidas voltadas ao setor residencial e de serviços é de 36,6%, no total geral do PNAEE, portanto acima da sua participação no consumo de energia final em Portugal (28%). Esta energia poupada [tep] corresponde a 17,8% da meta para execução até 2016 (face à energia final).

Face à energia primária, a participação de energia poupada [tep] pelas medidas voltadas ao setor residencial e de serviços é de 43,6%, no total geral do PNAEE, e corresponde a 15,5% da meta para execução até 2020 (face à energia primária). Estes números confirmam que o setor residencial e de serviços assume um papel decisivo no cumprimento dos objetivos elencados no PNAEE, mas também dão uma forte indicação de que a quantidade de medidas é insuficiente para o alcance das metas no curto e médios prazos (2016 e 2020, respetivamente).

Face à energia final, a participação de energia poupada [tep] pelas medidas abrangendo isolamento, janelas, climatização e FER (escopo do presente trabalho) é de 44%, no total para o setor residencial e de serviços, e de 16% no total geral do PNAEE. Esta energia poupada [tep] corresponde a 18,7% da meta para execução até 2016 no setor residencial e de serviços e de 7,9%, no total geral do PNAEE 2016 (face à energia final).

Face à energia primária, a participação de energia poupada [tep] pelas medidas voltadas a isolamento, janelas, climatização e FER corresponde a 12,6% da meta para execução até 2020 no setor residencial e de serviços, e de 5,8% no total geral do PNAEE, conforme pode ser observado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Impacto do setor residencial e serviços no PNAEE 2016.

Programa	Medida	Energia poupada [tep]		Meta [tep]		¹ Execução 2016	Meta [tep]		² Execução 2020
		Final	Primária	Final	Primária		Final	Primária	
Renove Casa & Escritório	Isolamento Eficiente	435	475	1068	1165	41%	1716	1872	25%
	Janela Eficiente	311	339	997	1088	31%	1500	1636	21%
	Calor Verde	15796	15796	110249	110249	14%	157354	157354	10%
Solar Térmico	Solar Térmico Residencial	16303	16303	52236	52236	31%	81238	81238	20%
	Solar Térmico Serviços	4532	4532	21371	21371	21%	34663	34663	13%
Sistema de Eficiência Energética nos Edifícios	SCE Edifícios Residenciais	57473	71554	77473	96453	74%	94580	117751	61%
	SCE Edifícios de Serviços	23697	29098	83272	102251	28%	152671	187465	16%
³ Renove Casa & Escritório	Equipamentos mais eficientes	99931	156869	189363	297257	53%	235535	361886	43%
	Iluminação eficiente	48530	76181	98236	154207	49%	98236	154207	49%
<i>Total</i>	<i>Residencial e Serviços</i>	<i>267008</i>	<i>371147</i>	<i>634265</i>	<i>836277</i>	<i>42%</i>	<i>857493</i>	<i>1098072</i>	<i>34%</i>
<i>Participação de Isolamento, Janelas, Climatização e FER</i>		<i>44%</i>	<i>37%</i>	<i>55%</i>	<i>46%</i>	<i>18,7%</i>	<i>61%</i>	<i>53%</i>	<i>12,6%</i>
<i>Total Geral</i>	<i>PNAEE</i>	<i>729077</i>	<i>850524</i>	<i>1501305</i>	<i>1773231</i>	<i>49%</i>	<i>2003954</i>	<i>2394064</i>	<i>36%</i>
<i>Participação de Isolamento, Janelas, Climatização e FER</i>		<i>16%</i>	<i>16%</i>	<i>23%</i>	<i>22%</i>	<i>7,9%</i>	<i>26%</i>	<i>24%</i>	<i>5,8%</i>

Nota: ¹ Face à energia final; ² Face à energia primária; ³ Medidas que não se enquadram nos objetivos do presente trabalho.

Embora a participação do setor de serviços (11,4%) no consumo de energia final em Portugal, não esteja tão distante da participação do setor residencial (16,6%), nota-se uma diferença significativa (para menor) nas metas de redução de consumo para os edifícios de serviços. Principalmente nas metas dos programas Solar Térmico e Sistema de Certificação Energética de Edifícios, é visível esta disparidade, inclusive no que se refere aos percentuais de execução para 2016 e 2020. A seguir, com base em informações extraídas do PNAEE 2016 [15], são descritos os programas para o setor residencial e de serviços, destacando-se as medidas que estão dentro do escopo do presente trabalho, nomeadamente as voltadas a isolamento térmico, janelas, climatização e FER.

- **Renove Casa & Escritório**

O objetivo deste programa é o de incentivar a substituição de equipamentos eletrodomésticos, elétricos e de iluminação no setor residencial e de serviços, induzindo a redução dos consumos energéticos. Faz parte deste programa a medida Isolamento Eficiente, a qual contempla intervenções nas envolventes dos edifícios para aplicação de isolamento térmico em coberturas, paredes exteriores e pavimentos. Esta medida prevê a instalação de cerca de 3 milhões de [m²] de isolamento térmico no parque edificado com necessidades de reabilitação, até 2016. Este potencial foi identificado por intermédio das medidas de melhoria incluídas nos certificados energéticos e também por via de apoios específicos direcionados à área da eficiência energética, cujas metas podem ser observadas na Tabela 2.3. No entanto, este objetivo foi revisto em baixa no PNAEE 2016 e o motivo é atribuído à crise económica.

Tabela 2.3. Impacto da medida “Isolamento Eficiente” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).

<i>Medida – Isolamento Eficiente</i>		<i>Energia final</i>	<i>Energia primária</i>
Resultado	Energia economizada (tep)	435	475
Metas	Meta a 2016 (tep)	1068	1165
	Execução face a 2016	41%	----
	Meta a 2020 (tep)	1716	1872
	Execução face a 2020	----	25%

Uma outra medida, Janela Eficiente, tem como finalidade promover a utilização de caixilharia com corte térmico e vidros eficientes (de baixa emissividade). A medida depende do pleno funcionamento do sistema de etiquetagem de produtos e prevê a instalação de 750 a 800 mil [m²] de envidraçados eficientes, até 2016. Este potencial foi estimado com base na quantidade de janelas vendidas no mercado para aplicação em reabilitação de edifícios e também por via de informações provenientes dos certificados energéticos. O sistema de etiquetagem prevê o registo dos fabricantes e o desenvolvimento de uma ferramenta que permita a comparação adequada do desempenho energético das diferentes janelas. Contudo, se este sistema não se tornar efetivo, as metas estarão ameaçadas (ver Tabela 2.4).

Tabela 2.4. Impacto da medida “Janela Eficiente” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).

<i>Medida – Janela Eficiente</i>		<i>Energia final</i>	<i>Energia primária</i>
Resultado	Energia economizada (tep)	311	339
Metas	Meta a 2016 (tep)	997	1088
	Execução face a 2016	31%	----
	Meta a 2020 (tep)	1500	1636
	Execução face a 2020	----	21%

A medida Calor Verde consiste no incentivo ao uso de recuperadores de calor, em alternativa aos meios tradicionais de aquecimento da área habitável (lareira aberta). Estes equipamentos possibilitam a distribuição uniforme do ar quente, combinando as vantagens da utilização de um sistema de ar forçado com o uso da biomassa, considerada uma fonte renovável de energia. A poupança potencial de energia é estimada em 75% por alojamento intervencionado, com base no inquérito ao consumo no setor doméstico efetuado pela DGEG e pelo Instituto Nacional de Estatística, em 2010 [17]. Este percentual significa uma redução de 0,68 [tep] por alojamento. O PNAEE considerou um crescimento anual no número de equipamentos instalados de 2%, conforme previsão dos fabricantes do setor, já que a biomassa é considerada uma das principais alternativas a evolução dos preços da eletricidade e do gás.

Também esta medida depende de sistemas de certificação para os equipamentos, para os instaladores e para a biomassa. Estão previstas campanhas de promoção para enaltecer as vantagens desta solução, cujas metas podem ser observadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Impacto da medida “Calor Verde” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).

<i>Medida – Calor Verde</i>		<i>Energia final</i>	<i>Energia primária</i>
Resultado	Energia economizada (tep)	15796	15796
Metas	Meta a 2016 (tep)	110249	110249
	Execução face a 2016	14%	----
	Meta a 2020 (tep)	157354	157354
	Execução face a 2020	----	10%

- Integração de Fontes de Energia Renováveis Térmicas/Solar Térmico

O programa Solar Térmico contém duas medidas para atingir o setor residencial e de serviços. A medida Solar Térmico Residencial tem como objetivo a instalação de 100 mil [m²] de coletores solares por ano, ou um total de 800 mil [m²] até 2016, cerca de 1,2 milhões de [m²] até 2020. Este objetivo engloba a reparação/manutenção ou até a substituição dos equipamentos existentes (ver o correspondente impacto em energia na Tabela 2.6). A medida Solar Térmico Serviços conta com a instalação de 40 mil [m²] de coletores solares por ano, alcançando cerca

de 330 mil [m²] até 2016, cerca de 500 mil [m²] até 2020 (ver Tabela 2.7). Estes potenciais também foram identificados por intermédio da certificação energética de edifícios. As medidas preveem o recurso a linhas de crédito e apoios específicos direcionados à eficiência energética.

Tabela 2.6. Impacto da medida “Solar Térmico Residencial” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).

<i>Medida – Solar Térmico Residencial</i>		<i>Energia final</i>	<i>Energia primária</i>
Resultado	Energia economizada (tep)	16303	16303
Metas	Meta a 2016 (tep)	52236	52236
	Execução face a 2016	31%	----
	Meta a 2020 (tep)	81238	81238
	Execução face a 2020	----	20%

Tabela 2.7. Impacto da medida “Solar Térmico Serviços” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).

<i>Medida – Solar Térmico Serviços</i>		<i>Energia final</i>	<i>Energia primária</i>
Resultado	Energia economizada (tep)	4532	4532
Metas	Meta a 2016 (tep)	21371	21371
	Execução face a 2016	21%	----
	Meta a 2020 (tep)	34663	34663
	Execução face a 2020	----	13%

- Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE)

O programa SCE tem como objetivo a melhoria da classe média de eficiência energética do parque edificado. O SCE obriga a que os edifícios novos ou as grandes intervenções em edificações existentes alcancem classes mais eficientes (B- a+). A meta é certificar com classe energética B- ou superior cerca de 268 mil alojamentos, até ao ano 2020. Este potencial e os respetivos impactos foram estabelecidos tendo por base a evolução no número de edifícios certificados verificada no SCE, até 2012, e as perspetivas de evolução da economia.

De salientar que o PNAEE estima que a redução do consumo de edifícios novos para os anos 2011-2012 foi de 0,203 [tep] por alojamento, considerando a melhoria do desempenho energético constatada na base de dados do SCE. Após 2013, através da aplicação do novo regime da certificação energética de edifícios previsto no Decreto-Lei 118/2013 [16], o PNAEE estima um novo fator de redução de consumo de energia por novo alojamento. A partir da relação entre os consumos **nominais** constantes nos certificados existentes no SCE e os valores **reais** resultantes do ICESD 2010, assume-se, então, uma redução do consumo de 0,23 [tep] por novo alojamento [15].

Nos edifícios existentes, as estimativas consideram o crescente número de certificações e a implementação de medidas de melhoria nestes edifícios. Optou-se por considerar o contributo individual de cada medida específica ao nível de outras medidas também previstas no PNAEE: Isolamento Eficiente, Janela Eficiente, Calor Verde e Solar Térmico. A Tabela 2.8 mostra o impacto desta medida.

Tabela 2.8. Impacto da medida “SCE Edifícios Residenciais” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).

<i>Medida – Solar Térmico Serviços</i>		<i>Energia final</i>	<i>Energia primária</i>
Resultado	Energia economizada (tep)	57473	71554
Metas	Meta a 2016 (tep)	77473	96453
	Execução face a 2016	74%	---
	Meta a 2020 (tep)	94580	117751
	Execução face a 2020	---	61%

No que se refere aos edifícios de serviços, o SCE obriga a que as novas edificações ou grandes intervenções alcancem classes mínimas (B- a+). O objetivo é certificar cerca da metade dos edifícios de serviços como classe energética B- ou superior, até 2020. O potencial foi estimado com base na área útil de pavimento dos edifícios certificados, desde a entrada em vigor do SCE e no âmbito do antigo Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) [39]. Estes edifícios passaram, a partir de 2013, a ser analisados no âmbito Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) que é parte integrante do Decreto-Lei 118/2013 [16], pelo que a projeção efetuada de 2013-2020 já teve este fator em consideração.

O impacto no consumo dos edifícios no âmbito do RECS para os anos 2011-2020, é de 2,49 [kgep/m²], considerando a melhoria do desempenho energético dos imóveis identificada na base de dados do SCE. Para os edifícios de serviços no âmbito do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), também parte integrante do Decreto-Lei 118/2013 [16], e tendo em atenção a informação existente na base de dados do SCE, a redução do consumo foi estimada em 0,173 [tep] por imóvel [15]. A Tabela 2.9 apresenta o impacto desta medida.

Apesar de todo o planeamento aqui apresentado, no primeiro semestre de 2015, a CE emitiu parecer fundamentado e fez um pedido formal para que Portugal e outros Estados-Membros assegurassem "a completa transposição da Diretiva de Eficiência Energética", o que não tinha ocorrido até aquela data [40]. Após isso, o potencial de cogeração de elevada eficiência e de sistemas de aquecimento e arrefecimento urbano foi abordado no Decreto-Lei 68-A/2015 [37]. Além de cumprir as exigências da diretiva e notificar sua transposição, Portugal tem de avaliar o potencial de eficiência energética das infraestruturas de gás e energia elétrica.

Tabela 2.9. Impacto da medida “SCE Edifícios de Serviços” no PNAEE 2016 (fonte: PNAEE [15]).

<i>Medida – Solar Térmico Serviços</i>		<i>Energia final</i>	<i>Energia primária</i>
Resultado	Energia economizada (tep)	23697	29098
Metas	Meta a 2016 (tep)	83272	102251
	Execução face a 2016	28%	----
	Meta a 2020 (tep)	152671	187.465
	Execução face a 2020	----	16%

O PNAEE tem o objetivo de garantir o cumprimento da meta de redução anual do consumo de energia final, mas algumas medidas são consideradas de difícil controlo e de efeito pouco mensurável. E, no âmbito do financiamento público, não se percebe os critérios para a proporcional distribuição dos recursos.

Como exemplo, são apresentados a seguir avisos de recursos financeiros disponíveis para a área Residencial e Serviços do PNAEE, os quais atendem o que está previsto no Plano de Atividades do Fundo de Eficiência Energética (FEE), para o ano de 2015 [41]. Em concretização dos programas Renove Casa & Escritório e Solar Térmico [15], é disponibilizado um financiamento total elegível de € 2.300.000,00:

- Aviso 09

Auditoria Energética a Elevadores em Edifícios de Serviços 2015, destinado à promoção da realização de auditorias energéticas a elevadores em edifícios de serviços, por empresas de manutenção reconhecidas pela DGEG e que resultem na emissão da etiqueta energética do elevador, com a dotação orçamental de € 400.000,00;

- Aviso 10

Edifício Eficiente 2015, destinado a apoiar a implementação de isolamento térmico total ou parcial (para o caso da cobertura) da envolvente opaca em edifícios residenciais anteriores a 1990 (unifamiliares ou multifamiliares), como forma de promover a reabilitação energética do parque edificado e do SCE, com a dotação orçamental de € 1.000.000,00;

- Aviso 11

Hotelaria – Incentivo à promoção da Eficiência Energética 2015, destinado a apoiar a instalação de Sistemas de Gestão Técnica Centralizada (SGTC) ou otimização/melhoria dos sistemas existentes em edifícios existentes do setor da indústria hoteleira, com a dotação orçamental de € 400.000,00;

- Aviso 12

Requalificação de Sistemas Solares Térmicos 2015, destinado a conceder apoios a auditorias e intervenções de requalificação de sistemas solares térmicos, no parque solar em edifícios de serviços, propriedade de Instituições Particulares de Solidariedade Social (IPSS) e Associações Desportivas de Utilidade Pública (ADUP), com uma dotação orçamental de € 500.000,00.

Em suma, embora suas metas de redução de consumo energético sejam notadamente inferiores às do setor residencial, os setores de serviços vem a receber uma injeção de recursos públicos de mais de 56,5% do total destes avisos. Tendo em conta a disparidade entre as metas dos setores residencial e de serviços, nos percentuais de execução para 2016 e 2020 e no âmbito dos programas Solar Térmico e Sistema de Certificação Energética de Edifícios, os avisos 11 e 12 fazem pouco sentido.

Cumpra salientar que os avisos 1 a 8 já estão fechados e os seus resultados publicados [41]. Em geral, a taxa de execução é baixa, sendo que o aviso 1 “Edifício Eficiente - 2012” não registou candidaturas. Seja devido a entraves burocráticos, seja por causa de falhas de comunicação, o facto é que o instrumento do financiamento público tem-se mostrado pouco eficaz no fomento da eficiência energética e na remoção de barreiras financeiras.

No âmbito da UE e de acordo com um recente estudo [42], há falta de vontade política para implementar os requisitos mínimos, remover barreiras e encontrar novas medidas. Isto é confirmado por uma avaliação dos planos nacionais de ação para a eficiência energética elaborados pelos Estados-Membros, realizada com fundos da Direção Geral de Energia da Comissão Europeia [43]. Segundo estes estudos os atuais planos não têm credibilidade necessária para garantir a redução do consumo de energia final em 1,5% ao ano. Apenas Dinamarca e Irlanda apresentaram planos credíveis, enquanto um grande número de Estados-Membros entregou planos incompletos ou pouco ambiciosos sobre como atingir poupanças de energia, nos próximos anos.

Baseados em estatísticas europeias do Eurostat, estes estudos mostram ainda desvios preocupantes entre os dados que foram reportados pelos Estados-Membros e as poupanças mínimas esperadas. Persiste a inclusão continuada de medidas potencialmente não elegíveis para a meta de eficiência energética, tais como poupanças nos edifícios que não ultrapassam requisitos mínimos europeus ou programas de incentivos para o uso de energias renováveis.

2.4.2 Diretiva das Fontes de Energia Renováveis (RES)

A RES também aborda um dos três pilares fundamentais identificados na Estratégia 20-20-20: incremento de 20% na quota de utilização de energias renováveis. Esta diretiva estipula que o cálculo da meta global de incorporação de FER é feito com base no consumo final bruto de energia, o que significa que ao consumo final de energia é necessário somar o autoconsumo das centrais elétricas e as perdas no transporte de energia.

Cada Estado-Membro tem um objetivo calculado no que respeita à sua quota e deve aplicar um plano de ação nacional que contemple os setores dos transportes, eletricidade, aquecimento e arrefecimento, para 2020. Estes planos de ação devem ter em conta os efeitos de outras medidas relacionadas com a eficiência energética no consumo final bruto de energia - quanto mais importante for a redução do consumo de energia, menos energia proveniente de fontes renováveis será necessária para alcançar o objetivo.

Cada Estado-Membro deve também estar em condições de garantir a origem da eletricidade e também da energia de aquecimento e de arrefecimento provenientes de fontes de energia renováveis. A informação contida nestas garantias de origem é normalizada e deve ser reconhecida em todos os Estados-Membros. Pode também ser utilizada para fornecer aos consumidores informações relativas à composição das diferentes fontes de eletricidade. Os Estados-Membros podem ainda “trocar” quantidade de energia proveniente FER e implantar projetos em parceria, através de um mecanismo comum de cooperação em eletricidade e energia para aquecimento e arrefecimento, a partir de fontes renováveis.

Até 2010, o uso FER na UE cresceu fortemente. No entanto, em 2011, houve uma diminuição devido ao efeito combinado de tempo quente, um progresso mais lento na aplicação da RES e a vacilante situação económica da Europa. Ainda sim, a participação de FER no consumo final bruto de energia aumentou, uma vez que o consumo de energia de combustíveis fósseis caiu mais do que o de FER. Em 2012, a quota de energia proveniente de fontes renováveis aumentou novamente, para 14,3%, atingindo 15,0%, em 2013 [44].

Portugal posicionou-se de forma satisfatória e tem plenas condições de alcançar os objetivos propostos para 2020. O país tem registado uma evolução favorável no que respeita à meta de incorporação de FER no consumo final bruto de energia, desde 2005 (ano considerado base de cálculo para a meta) até ao momento. No período compreendido entre 2004 e 2013, a monitorização efetuada permitiu verificar que a quota global de FER alcançou 25,7% do consumo final bruto de energia, o que representa uma evolução de 6,5 pontos percentuais face a 2004, como se pode observar na Tabela 2.10 [44].

Tabela 2.10. Participação [%] de FER no consumo final bruto de energia (fonte: Eurostat [44]).

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Objetivo 2020
<i>UE-28</i>	8,3	8,7	9,2	10,0	10,5	11,9	12,5	12,9	14,3	15,0	20,0
<i>Portugal</i>	19,2	19,5	20,8	21,9	23,0	24,4	24,2	24,7	25,0	25,7	31,0

Para alcançar os compromissos de Portugal, o PNAER estabelece medidas para os setores exigidos pela RES. São considerados dois cenários: um Cenário de Referência, que não contempla os efeitos das medidas de eficiência energética, e um Cenário de Eficiência Energética Adicional, que considera os impactos das medidas do PNAEE 2016 [15].

As projeções do consumo energético no Cenário de Referência e no Cenário de Eficiência Energética Adicional foram calculadas com base no modelo LEAP (*Long Range Energy Alternatives Planning System*), programado para ter como referência o ano de 2010, tendo por base toda a informação estatística do setor energético existente até àquela data. A Figura 2.8 representa a evolução expectável do consumo final bruto de energia para os dois cenários considerados.

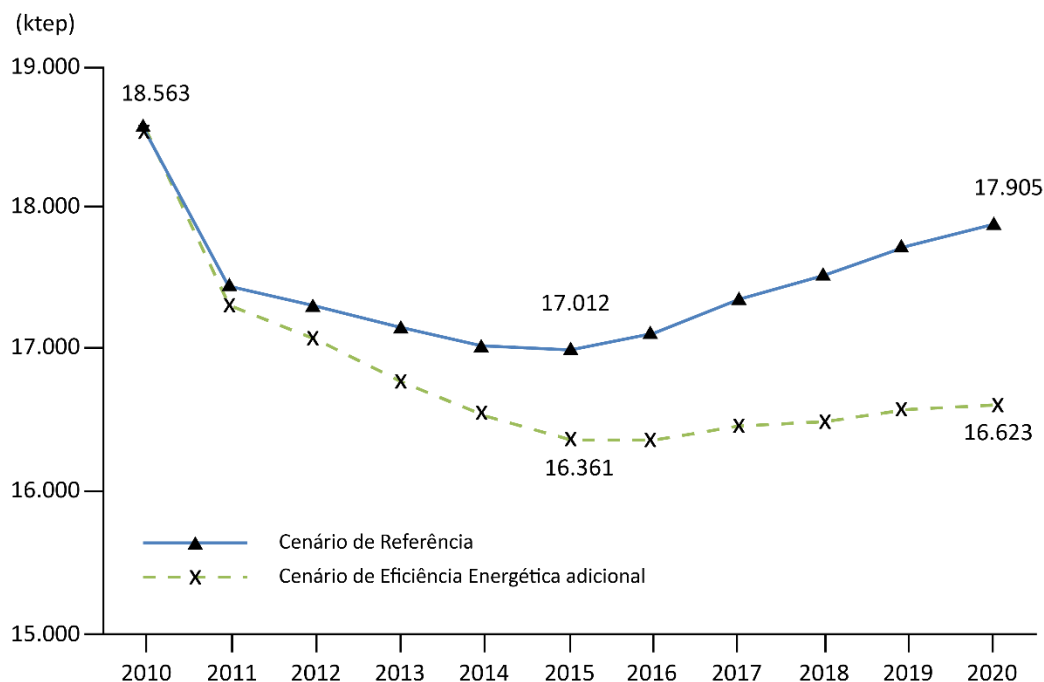


Figura 2.8. Evolução prevista do consumo final bruto de energia [ktep] (fonte: PNAER [15]).

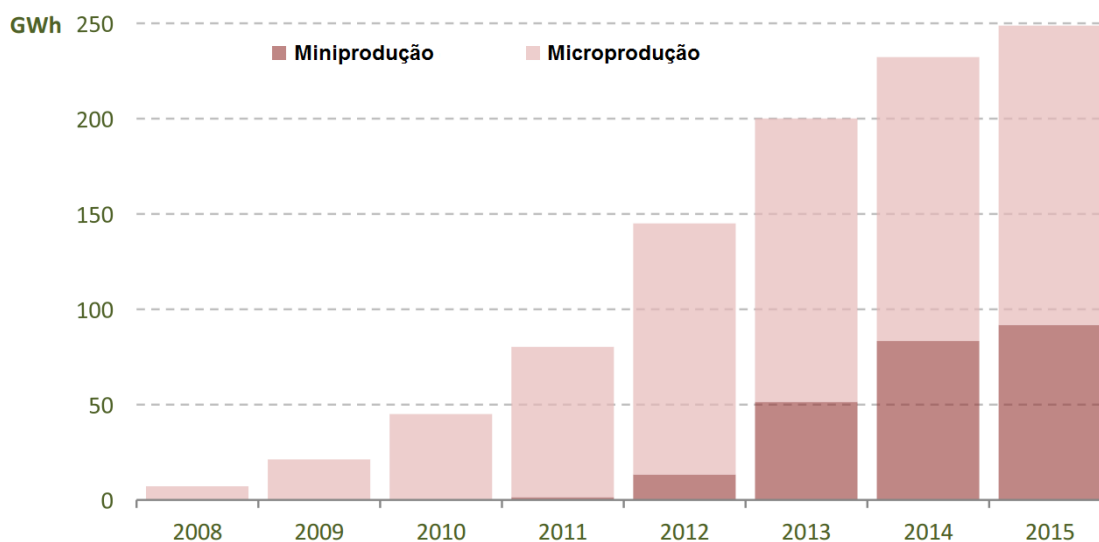
O PNAER projeta para 2020 um aumento da quota de FER em eletricidade, alcançando o patamar de 49,6%, no Cenário de Referência e 59,6%, no Cenário de Eficiência Energética Adicional [15]. Como mostra a Tabela 2.11, a produção de energia elétrica através de FER cresceu substancialmente, nos últimos 10 anos.

Tabela 2.11. Participação [%] de FER em eletricidade (fonte: Eurostat [44]).

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
UE-28	14,3	14,8	15,3	16,1	17,0	19,0	19,6	21,7	23,5	25,4
Portugal	27,5	27,7	29,3	32,3	34,1	37,6	40,7	45,9	47,6	49,2

No que diz respeito à eletricidade produzida em edifícios, o PNAER determinou a revisão das metas e objetivos de mini e microprodução. Criado em 2011, o programa para a miniprodução, tem o objetivo de instalar cerca de 250 [MW] até 2020, sendo dirigido, fundamentalmente, aos setores de indústria e de serviços (edifícios públicos, escolas e grandes armazéns de distribuição), para potências até 250 [kW], consoante as tecnologias.

No entanto, no caso microprodução, houve uma redução das taxas de referência para remuneração da produção de eletricidade, a partir de 2014 [45]. O valor monetário relativo à energia produzida e vendida à rede resulta de 90% da média aritmética simples dos preços de fecho do Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE) para Portugal (mercado diário), relativos ao mês de produção, em [€/kWh]. Atualmente, este valor é inferior a 20% do custo médio do [kWh] de eletricidade. A Figura 2.9 mostra a evolução da mini e microprodução [46].



Nota: Valores de 2015 consideram ano-móvel - maio de 2014 a abril de 2015.

Figura 2.9. Evolução da mini e microprodução [GWh] (fonte: DGEG [46]).

No setor do aquecimento e arrefecimento a projeção para 2020 é de 33,6%, no Cenário de Referência e 35,9%, no Cenário de Eficiência Energética Adicional [15], com um maior contributo do solar térmico, seguido da biomassa. Neste domínio, destaca-se potencial contributo do Decreto-Lei 118/2013 [16] para a promoção das tecnologias de aquecimento de área habitável e de preparação de águas quentes sanitárias (AQS), com base na utilização de FER, em especial através da utilização de sistemas solares térmicos, caldeiras e recuperadores de calor a biomassa e bombas de calor.

No entanto, o uso de FER neste setor é já uma realidade. Comparando-se com a média europeia, o uso de FER para aquecimento e arrefecimento é bastante superior, como se observa na Tabela 2.12. Apesar disso, a maior parte desta energia provém do uso de lenha no setor doméstico, o que tende a diminuir, face à crescente introdução do gás natural e de tecnologias de alta eficiência.

Tabela 2.12. Participação [%] de FER em aquecimento e arrefecimento (fonte: Eurostat [44]).

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<i>UE-28</i>	9,9	10,3	10,9	11,9	12,0	13,7	14,1	15,0	16,1	16,5
<i>Portugal</i>	32,5	32,1	34,2	35,0	37,5	38,0	33,9	35,2	34,0	34,5

A obrigação de instalação de painéis solares em toda e qualquer nova construção e em renovações de valor superior a 25% do imóvel [16] deve mudar substancialmente o perfil da participação de FER, neste setor [15]. A seguir, apresenta-se um breve resumo das principais tecnologias FER referidas no PNAER, para aquecimento e arrefecimento em edifícios:

- Sistemas solares térmicos

Estima-se que estejam instalados cerca de 1 milhão de [m²] de painéis solares térmicos, dois terços dos quais no setor residencial e o restante no setor dos serviços [15]. As imposições regulamentares para a promoção desta tecnologia proporcionaram um aumento do número de equipamentos instalados nos últimos anos. Até 2020, o PNAER prevê que estejam instalados cerca de 2.214.282 [m²], o que corresponde a uma taxa de crescimento média anual de 11,5%, entre 2010 e 2020. Para este resultado seja alcançado, conta-se com as medidas de incentivo ao investimento, onde se inclui o FEE e o Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN).

- Sistemas a biomassa

Como já referenciado, a biomassa representa a maior parte do consumo de energia para aquecimento e arrefecimento entre as FER (com um peso de 97% em 2010), tendo também um peso significativo no consumo de energia final, correspondente a 7% do total, também em 2010 [15]. O PNAER prevê que o uso de biomassa se beneficie do aumento estimado dos preços dos combustíveis fósseis e da eletricidade, até 2020. Em consequência, estima-se o crescimento gradual da participação dos sistemas a biomassa, nomeadamente recuperadores de calor e caldeiras a *pellets*, especialmente no setor doméstico.

- Bombas de calor

Existe a expectativa de que a CE recomende a inserção da contribuição da energia aerotérmica, geotérmica e hidrotérmica captada por bombas de calor nos cálculos da quota de FER, tendo em conta as diferentes condições climáticas. A RES ainda não permite aos Estados-Membros contabilizar esta contribuição das bombas de calor no suprimento das necessidades de energia para aquecimento e/ou arrefecimento, a qual é atualmente nula. As futuras revisões do Decreto-Lei 118/2013 [16] podem vir a potenciar a instalação destes equipamentos para fazer face às exigências crescentes de melhoria do desempenho energético dos edifícios [15].

2.4.3 Diretiva relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD)

A EPBD é a principal diretiva europeia para a utilização eficiente da energia no setor da construção, pois estabelece requisitos mínimos para edifícios novos e existentes, sugere uma metodologia de cálculo de desempenho energético e estabelece a certificação energética, com a preocupação de atingir níveis de rentabilidade económica. A diretiva apenas exige aos Estados-Membros que estabeleçam requisitos mínimos e mecanismos para sua aplicação, não determinando um padrão mínimo europeu. Apesar disso, destaca-se o papel da EPBD na inserção da temática de desempenho energético, no âmbito de discussões dos formuladores de políticas.

Tendo em conta que o Protocolo de Quioto estabelece compromissos para a redução da emissão dos gases com efeito estufa e que a EPBD orienta medidas que visam o aumento da eficiência energética dos edifícios novos e existentes, sobretudo na fase de uso do edifício, promovendo o emprego de fontes de energia renováveis, é notório que estas iniciativas se complementam, pois tais orientações corroboram para a diminuição das emissões.

No entanto, é possível identificar claramente na EPBD a preocupação com a segurança energética e é natural que a garantia de aprovisionamento imediato de energia se sobreponha à mitigação das alterações climáticas. De qualquer forma, políticas destinadas a responder a preocupações de segurança energética relacionadas com a concentração de recursos têm potencialmente efeitos positivos na mitigação das alterações climáticas. Em ambos os casos, a redução do uso de combustíveis fósseis, através do aumento da eficiência energética e do recurso a fontes de energia renováveis favorece o alcance de objetivos comuns de longo prazo.

No âmbito das medidas que trazem retorno no longo prazo, a EPBD introduz o conceito “*nearly Zero-Energy Buildings*” (nZEB). Este conceito promove edifícios à condição de quase autossuficiência. A EPBD exige que os Estados-Membros adotem planos e políticas para garantir que, até 2020, os edifícios novos tenham necessidades quase nulas de energia. No caso dos edifícios de propriedade pública esta obrigação deve ser antecipada para 2018. A expressão “quase nulas” tem sido objeto de discussões, pois carece de precisão. Prevalece o entendimento de que se trata de um edifício com desempenho energético próximo ou equivalente ao dos edifícios passivos, no que respeita à envolvente do edifício, e por uma parte do consumo ser assegurado por energias renováveis [47].

A norma Passivhaus para a Europa Central exige que o edifício seja projetado para ter necessidades máximas de aquecimento não superiores a 15 [kWh/(m².a)] e necessidades de arrefecimento igualmente não superiores a 15 [kWh/(m².a)] [8]. O consumo total de energia primária (energia primária para aquecimento, água quente e eletricidade) não deve ser superior a 120 [kWh/(m².a)] [47]. Na UE a maior parte das definições de nZEB referem-se às necessidades máximas de energia primária como um dos principais indicadores. No caso das habitações, a maioria dos países estabelece como objetivo um consumo de energia primária não superior a 50 [kWh/(m².a)] [48].

Para os edifícios existentes, a EPBD impõe que os Estados-Membros apliquem medidas de cumprimento de requisitos mínimos de desempenho energético em termos técnicos, funcionais e económicos, nas situações em que estes edifícios sofram grandes renovações, ou quando elementos da envolvente do edifício existente, com grande impacto energético, sejam renovados ou substituídos. Os Estados-Membros podem transpor a definição de «*grandes obras de renovação*» para o contexto nacional em termos de uma percentagem da superfície envolvente do edifício ou em termos do valor do edifício. Se um Estado-Membro decidir definir as grandes obras de renovação em termos do valor do edifício, poderão ser utilizados o valor atuarial ou o valor corrente baseado no custo da reconstrução, excluindo o valor do terreno no qual o edifício se encontra, em ambos os casos [9].

Na EPBD, existem exceções à obrigatoriedade de cumprir os requisitos mínimos, como é o caso de «edifícios oficialmente protegidos como parte de um ambiente classificado ou devido ao seu valor arquitetónico ou histórico especial, na medida em que o cumprimento de certos requisitos mínimos de desempenho energético poderia alterar de forma inaceitável o seu carácter ou o seu aspeto» [9].

A fim de alcançar um nível ideal de desempenho, os Estados-Membros devem criar um conjunto de edifícios de referência a serem utilizados nos cálculos de rentabilidade, em âmbito nacional ou regional. De acordo com o anexo III da EPBD, edifícios de referência são caracterizados por edifícios representativos de sua funcionalidade e localização geográfica, incluindo condições de clima interior e exterior.

A EPBD exige que Estados-Membros definam, pelo menos, dois edifícios de referência para os edifícios existentes sujeitos a renovação, os quais representem o parque imobiliário típico, uma vez que é impossível calcular a situação ótima para cada caso. As categorias de edifícios indicadas são habitações unifamiliares, blocos de apartamentos, edifícios de escritórios e outros edifícios não residenciais listados no anexo I da EPBD. Os Estados-Membros podem escolher definir um edifício de referência para cada categoria de construção ou definir um edifício de referência considerado representativo de duas ou mais categorias de edifícios.

Na Figura 2.10, apresenta-se a evolução normativa relativa a este tema em Portugal, em grande parte graças às crescentes exigências impostas pela União Europeia e a consequente necessidade de transposição de requisitos para o âmbito nacional.

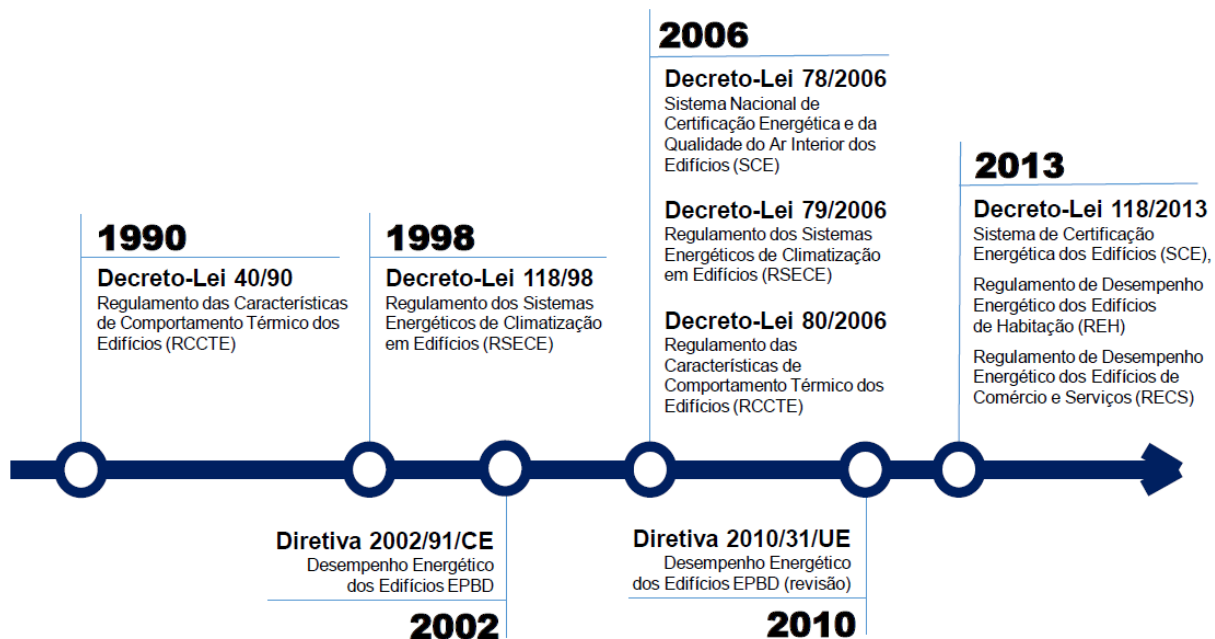


Figura 2.10. Evolução legislativa em Portugal (fonte: ADENE [49]).

A legislação que marcou o início da preocupação com recursos energéticos ao nível do setor de edifícios, em Portugal, data da década de 90. O Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE) teve como objetivo estabelecer regras para projetos de edifícios, de forma a garantir exigências de conforto térmico (sem consumos excessivos de energia) e evitar patologias. Pela primeira vez, tornou-se obrigatória a aplicação de isolamento térmico na envolvente [50].

O Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) surgiu em 1998, impondo um conjunto de requisitos ao dimensionamento e instalação de sistemas de climatização. Esta norma não exigia rendimentos mínimos para equipamentos e também esbarrou na falta de qualificações de projetistas, não impedindo o aumento do consumo energético no setor de edifícios.

No final de 2002, foi aprovada a EPBD [30], impondo que a legislação portuguesa fosse atualizada. As legislações que passaram a atender estas exigências foram o Decreto-Lei 78/2006 – Sistema de Certificação Energética (SCE) e da Qualidade do Ar interior dos Edifícios [51], o Decreto-Lei 79/2006 – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) [39] e o Decreto-Lei 80/2006 – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [52]. A nova regulamentação tornou-se, rapidamente, um instrumento essencial em termos de exigências para o desempenho energético de edifícios, com desdobramentos no contexto social, económico e ambiental.

O Decreto-Lei 78/2006 estabeleceu a implementação de um sistema de certificação energética, com o objetivo de informar o cidadão sobre a qualidade térmica dos edifícios, por ocasião da construção, da venda ou do arrendamento dos mesmos, exigindo também que este sistema abrangesse igualmente todos os edifícios públicos e edifícios frequentemente visitados pelo público.

O Decreto-Lei 79/2006, veio definir um conjunto de requisitos aplicáveis a edifícios de serviços e de habitação dotados de sistemas de climatização com potência superior a 25 [kW], os quais, para além dos aspetos relacionados com a envolvente e a limitação dos consumos energéticos, abrangiam também a eficiência e manutenção dos sistemas de climatização dos edifícios, impondo a realização de auditorias energéticas periódicas aos edifícios de serviços. A necessidade desta norma deveu-se à intensificação da procura de sistemas de climatização e preocupações crescentes com estimativas de aumento exponencial do consumo energético neste segmento, principalmente no setor dos edifícios de serviços.

Finalmente, o Decreto-Lei 80/2006 estabeleceu requisitos de qualidade para os novos edifícios de habitação e de pequenos edifícios de serviços com sistemas de climatização com potência inferior a 25 [kW], nomeadamente ao nível das características da envolvente, limitando as perdas térmicas e o controlo dos ganhos solares. Com a crescente utilização de equipamentos de aquecimento e arrefecimento, foi necessária a introdução de maiores exigências de qualidade térmica. Assim, foram impostos novos limites aos consumos energéticos para a climatização e

produção de águas quentes, num claro incentivo à utilização de sistemas eficientes. Este Decreto determinou também a obrigatoriedade da instalação de coletores solares e valorizou a utilização de outras fontes de energia renováveis ou com menor impacto em termos de energia primária ([49], [52]).

A reformulação da EPBD ocorreu no primeiro semestre de 2010 com a publicação da Diretiva 2010/31/UE [9], que procura esclarecer e reforçar as disposições anteriores. Visando a transposição desta reformulação para o direito português, foi publicado o Decreto-Lei 118/2013 [16] que entrou em vigor no final de 2013. Esta publicação reviu toda a legislação, o que se consubstancia em melhorias ao nível da sistematização e âmbito de aplicação ao incluir, num único diploma, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH). O REH desempenha um papel preponderante devido à relevância do setor residencial e os impactos socioeconómicos provocados por esta regulamentação, em Portugal.

A caracterização do parque edificado e sua localização são essenciais no estabelecimento dos parâmetros regulamentares. No processo de revisão da regulamentação portuguesa, optou-se pela criação de edifícios de referência virtuais utilizando-se dados estatísticos de mais de 800 mil de Certificados de Desempenho Energético da Agência para a Energia de Portugal (ADENE) [49]. Foram também utilizados os dados estatísticos de inquéritos a residentes fornecidos pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) e pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) [17].

Os edifícios de referência de habitação estabelecidos incluem as tipologias unifamiliar e multifamiliar. A área útil de pavimento utilizada em cálculos parte do somatório de espaços interiores úteis, pertencentes a cada categoria de edifícios. Existem soluções construtivas e de desempenho energético de referência para edifícios novos e, para além destes, o REH distingue três padrões bem definidos de edifícios, consoante suas respectivas épocas de construção: os anteriores a 1960, os construídos entre 1960 e 1990 e os do período entre 1990 e 2012. Em termos de zonamento climático, o país está dividido em três zonas climáticas de inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3).

O cálculo das necessidades de energia útil destes edifícios são realizados pelo método sazonal, prescrito na norma europeia EN ISO 13790:2008, e de acordo com a regulamentação transposta nos despachos 15793- x /2013 (o termo x pode assumir as letras C a L). A referida norma permite adaptações, sendo que cada edifício e/ou respetiva fração autónoma são tratados como uma única zona, com condições interiores de referência. Visando a garantia do conforto térmico, a climatização é considerada como ocorrendo em regime permanente, ao longo das estações de aquecimento e de arrefecimento.

Logo, as necessidades energéticas de aquecimento de um edifício, N_{ic} , são calculadas através da seguinte expressão:

$$N_{ic} = [Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - \eta_i \cdot (Q_{int,i} + Q_{sol,i})] / A_p \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})] \quad (2)$$

em que $Q_{tr,i}$ e $Q_{ve,i}$ representam os coeficientes de transferência de calor por transmissão e por ventilação, respetivamente, dados em [kWh/a]; η_i é o fator de utilização de ganhos térmicos na estação de aquecimento; $Q_{int,i}$ e $Q_{sol,i}$ são, respetivamente, os ganhos solares internos e através dos vãos envidraçados, também em [kWh/a]; A_p é a área útil de pavimento interior, em [m²].

As necessidades energéticas de arrefecimento do edifício, N_{vc} , são calculadas através da seguinte expressão:

$$N_{vc} = (1 - \eta_v) \cdot Q_{g,v} / A_p \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})] \quad (3)$$

em que η_v é o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento; $Q_{g,v}$, representa os ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento, dados em [kWh/a]; A_p é a área útil de pavimento interior, em [m²].

As necessidades energéticas produção de AQS durante um ano, Q_a , são calculadas através da seguinte expressão:

$$Q_a = (M_{AQS} \cdot 4187 \cdot \Delta T \cdot n_d) / 3600000 \quad [\text{kWh}/\text{a}] \quad (4)$$

em que M_{AQS} é o consumo médio diário de referência, em [l]; ΔT , é o aumento de temperatura necessário para a preparação das AQS e que, para efeitos do presente cálculo, toma valores de referência de 35°C; n_d representa o número anual de dias de consumo de AQS de edifícios residenciais que, para efeitos do presente cálculo, se considera de 365 dias.

Quando o edifício dispõe de sistemas mecânicos de ventilação com funcionamento contínuo (podem ter caudal constante ou variável) deve ser estimado o consumo de energia elétrica de funcionamento dos ventiladores, W_{vm} , pela expressão:

$$W_{vm} = \frac{V_f}{3600} \cdot \frac{\Delta P}{\eta_{tot}} \cdot \frac{H_f}{1000} \quad [\text{kWh}/\text{a}] \quad (5)$$

em que V_f é o caudal de ar médio diário escoado através do ventilador, em [m³]; ΔP , é a diferença de pressão total do ventilador, em [Pa]; η_{tot} é o rendimento total de funcionamento do ventilador; H_f representa o número de horas de funcionamento dos ventiladores durante um ano [h]. Por defeito considera-se que os ventiladores funcionam 24h/dia, devendo ser tomado o valor de 8.760 h, sendo que, nos sistemas de ventilação híbridos, pode ser adotado outro valor desde que seja fundamentado com uma estimativa anual de funcionamento da ventilação da fração.

No Despacho 15793-I/2013 do Decreto-Lei 118/2013 [16], as necessidades nominais de energia primária de um edifício de habitação, N_{tc} , resultam da soma das necessidades nominais

específicas de energia primária relacionadas com os diferentes usos: aquecimento, N_{ic} , arrefecimento, N_{vc} , produção de AQS, Q_a/A_p , e ventilação, $W_{vm,j}/A_p$, deduzidas de eventuais contribuições de fontes de energia renováveis, $E_{ren,p}/A_p$, de acordo com a seguinte expressão:

$$N_{tc} = \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{i,k} \cdot N_{ic}}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{v,k} \cdot \delta \cdot N_{vc}}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} \\ + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{a,k} \cdot Q_a/A_p}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \frac{W_{vm,j}}{A_p} \cdot F_{pu,j} \quad [\text{kWh}_{EP}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})] \quad (6) \\ - \sum_p \frac{E_{ren,p}}{A_p} \cdot F_{pu,p}$$

Em que:

N_{ic} Necessidades de energia útil para aquecimento, supridas pelo sistema k [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$];

$f_{i,k}$ Parcela das necessidades de energia útil para aquecimento supridas pelo sistema k ;

N_{vc} Necessidades de energia útil para arrefecimento, supridas pelo sistema k [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$];

$f_{v,k}$ Parcela das necessidades de energia útil para arrefecimento supridas pelo sistema k ;

Q_a Necessidades de energia útil para produção de AQS, supridas pelo sistema k [kWh/ano];

$f_{a,k}$ Parcela das necessidades de energia útil para produção de AQS supridas pelo sistema k ;

η_k Eficiência do sistema k , que toma o valor de 1 no caso de sistemas para aproveitamento de fontes de energia renováveis, à exceção de sistemas de queima de biomassa sólida em que deve ser usada a eficiência do sistema de queima;

j Todas as fontes de energia, incluindo as de origem renovável;

p Fontes de origem renovável;

$E_{ren,p}$ Energia produzida a partir de fontes de origem renovável p , incluindo apenas energia consumida [kWh/ano];

$W_{vm,j}$ Energia elétrica necessária ao funcionamento dos ventiladores [kWh/ano];

A_p Área útil de pavimento [m^2];

δ Pode tomar o valor 0, sempre que o fator de utilização de ganhos térmicos na estação de arrefecimento seja superior ao respetivo fator de referência, o que representa as condições em que o risco de sobreaquecimento se encontra minimizado;

$F_{pu,j}$ Fator de conversão de energia útil para energia primária, a partir da fonte de energia j [$\text{kWh}_{EP}/\text{kWh}$];

$F_{pu,p}$ Fator de conversão de energia útil para energia primária, a partir da fonte de energia renovável p [$\text{kWh}_{EP}/\text{kWh}$].

De acordo com a EPBD, os Estados-Membros devem calcular as necessidades de energia primária por intermédio de fatores de conversão de energia primária, estabelecidos a nível nacional. Para economias de eletricidade em [kWh], os Estados-Membros podem aplicar um coeficiente de 2,5 [kWh_{EP}/kWh] por omissão, refletindo a estimativa de uma média de 40 % de eficiência da produção da UE durante o período em causa. No entanto, segundo a Diretiva 2006/32/CE [53], os Estados-Membros podem aplicar um coeficiente diferente, desde que o justifiquem.

Em Portugal, os fatores de conversão entre energia útil e energia primária são definidos pelo diretor-geral de Geologia e Energia, periodicamente. Os atuais fatores de conversão constam no Despacho 15793-D/2013 [16], que faz parte do REH. Em função do *mix* energético em Portugal, para a eletricidade o fator de conversão, F_{pu} , assume o valor de 2,5 [kWh_{EP}/kWh]. Para combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos não renováveis o valor adotado é 1 [kWh_{EP}/kWh] e para a energia térmica de origem renovável o fator de conversão é também igual a 1 [kWh_{EP}/kWh].

Neste mesmo despacho, os fatores de conversão de energia primária para emissões de CO₂ preconizados para a eletricidade é 0,144 [kgCO₂/kWh] e, para o gás natural, 0,202 [kgCO₂/kWh]. Para fontes de energia renováveis, o fator de conversão de energia primária para emissões de CO₂ é nulo.

O valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia primária, N_t , corresponde ao valor das referidas necessidades, admitindo-se a inexistência de consumos de energia associados à ventilação mecânica e de sistemas de aproveitamento de energias renováveis, incluindo sistemas de energia solar para preparação de águas quentes sanitárias (AQS), considerando-se valores e condições de referência para os principais parâmetros, em substituição das soluções previstas ou instaladas no edifício e calculando de acordo com a seguinte expressão:

$$N_t = \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{i,k} \cdot N_i}{\eta_{ref,k}} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{v,k} \cdot N_v}{\eta_{ref,k}} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{a,k} \cdot Q_a / A_p}{\eta_{ref,k}} \right) \cdot F_{pu,j} \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})] \quad (7)$$

Em que:

N_i Valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento [kWh/(m²·ano)], determinado aplicando-se coeficientes e fatores de referência estabelecidos na Portaria n.º 349-B/2013;

$f_{i,k}$ Parcela das necessidades de energia útil para aquecimento supridas pelo sistema k ;

- N_v Valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento [kWh/(m².ano)], determinado aplicando-se coeficientes e fatores de referência estabelecidos na Portaria n.º 349-B/2013;
- $f_{v,k}$ Parcela das necessidades de energia útil para arrefecimento supridas pelo sistema k ;
- Q_a Necessidades de energia útil para produção de AQS, supridas pelo sistema k [kWh/(m².ano)];
- $f_{a,k}$ Parcela das necessidades de energia útil para produção de AQS supridas pelo sistema k ;
- $\eta_{ref,k}$ Valores de referência para o rendimento dos diferentes tipos de sistemas técnicos utilizados ou previstos para aquecimento do ambiente, arrefecimento do ambiente e preparação de AQS;
- A_p Área útil de pavimento [m²];
- $F_{pu,j}$ Fator de conversão para energia primária, de acordo com a fonte de energia j do tipo de sistemas de referência utilizado [kWh_{EP}/kWh].

A relação entre os valores de necessidades nominais e o seu limite, de energia útil para aquecimento, arrefecimento e energia primária de edifícios sujeitos a grandes intervenções, deve ser verificado conforme coeficientes indicados na Tabela 2.13 e em função do ano de construção do edifício.

Tabela 2.13. Relação entre os valores das necessidades nominais e limites, de energia útil para aquecimento, arrefecimento e energia primária de edifícios sujeitos a grandes intervenções.

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

O REH também estabelece limites de coeficiente de transmissão térmica para elementos da envolvente opaca, onde se incluem coberturas, paredes, ou pavimentos, conforme localização geográfica do edifício. Adicionalmente, estabelece valores de taxas de renovação horária.

2.4.4 Regulamento Delegado n.º 244

A EPBD [9] propôs o desenvolvimento de um quadro de metodológico comparativo para calcular os níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios, bem como dos seus componentes. Nesse sentido, surgiu o Regulamento Delegado (UE) n.º 244/2012 [7], que veio complementar a EPBD e especificar regras para comparação da rentabilidade de medidas de eficiência energética e do uso de fontes de energias renováveis em edifícios novos e existentes. Os regulamentos delegados ou autorizados são limitados pelo ato normativo em razão do qual são editados (pelas leis ou até mesmo pela Constituição).

O quadro metodológico estabelecido no Regulamento Delegado (UE) n.º 244 é baseado no desempenho das várias soluções possíveis para a envolvente do edifício e para os sistemas a serem utilizados no suprimento das suas necessidades energéticas. O desempenho destas soluções é avaliado em termos de necessidades de energia primária (em [kWh/(m².a)]) e do custo global para sua implementação e manutenção (em [€/m²]), sendo os cálculos de otimização de rentabilidade realizados sob as perspectivas macroeconómica e financeira.

As várias soluções possíveis devem ser analisadas individualmente e também no âmbito de pacotes de medidas de eficiência energética, os quais podem incluir o uso de fontes de energia renováveis. Os Estados-Membros devem apresentar à Comissão Europeia as informações e os resultados da determinação dos níveis ótimos de rentabilidade para o desempenho energético dos edifícios, percorrendo os seguintes passos:

- Definição e caracterização dos edifícios de referência que representam o parque edificado nacional;
- Definição de pacotes de medidas para o melhor desempenho energético dos edifícios de referência, incluindo medidas de melhoria da envolvente, substituição dos sistemas de aquecimento e arrefecimento da área habitável, de águas quentes sanitárias (AQS) e utilização de sistemas baseados em fontes de energia renováveis;
- Cálculo das necessidades energéticas dos edifícios de referência quando submetidos a cada um dos diversos pacotes de medidas de eficiência;
- Cálculo do custo global de implementação de cada pacote de medidas de eficiência nos edifícios de referência e o custo de energia associado;
- Estabelecimento dos níveis ótimos de rentabilidade das medidas de eficiência decorrentes dos cálculos do custo global e das análises de sensibilidade dos principais parâmetros;
- Comparação entre os níveis ótimos de rentabilidade e os requisitos mínimos de desempenho energético em vigor;
- Justificativa à Comissão Europeia e/ou estabelecimento de planos de ação, caso os níveis ótimos de rentabilidade se distanciem muito (acima de 15%) dos requisitos mínimos de desempenho energético em vigor.

É fundamental que as construções que sirvam de referência sejam representativas do parque edificado nacional típico, uma vez que não é possível calcular os níveis ótimos de rentabilidade para cada edifício individualmente. Pode-se inclusive definir edifícios de referência de forma que o resultado do cálculo de otimização da rentabilidade seja aplicável a várias categorias de edifícios. Contudo, criar um edifício de referência é uma operação complexa e a sua precisão depende, em grande parte, da quantidade de pormenores exigidos na sua definição [54].

O parque imobiliário europeu é bastante heterogéneo em termos de zonas climáticas, estilos de construção e uso. Recomenda-se que os edifícios de referência sejam estabelecidos através da seleção de um exemplo **real** que represente o edifício mais típico de uma categoria específica ou por intermédio da criação de um edifício **virtual**.

Os parâmetros relevantes na sua caracterização são: tipo de utilização e padrão de ocupação, área construída, densidade do edifício expressa como área envolvente/fator de volume, qualidade da envolvente do edifício com o valor U (coeficiente de transmissão térmica) correspondente, sistemas de serviços técnicos e vetores energéticos, juntamente com a respetiva quota de utilização da energia [11].

Na definição de medidas de eficiência energética e de medidas baseadas nas fontes de energia renováveis, deve-se ter em conta os elementos dos edifícios de referência com maior influência em seu desempenho energético. A seleção criteriosa das alterações a serem introduzidas tem papel fundamental na posterior identificação dos níveis ótimos de rentabilidade.

Tais medidas devem incluir diferentes sistemas convencionais e baseados em FER, diferentes materiais e espessuras de isolamento da envolvente opaca, envidraçados e medidas passivas que influem nas necessidades energéticas. É importante considerar que a adoção de determinada medida pode afetar o desempenho energético e a rentabilidade das demais e esta interação deve ser compreendida em ambos os aspetos.

O desempenho energético dos edifícios de referência deve ser calculado em consonância com o quadro geral comum previsto no anexo I da EPBD [9]. É necessário o cálculo das necessidades de energia primária para o estabelecimento da sua relação com os níveis mínimos de custo global.

Inicialmente, calcula-se as necessidades de energia útil, relativamente à área de pavimento definida a nível nacional. A seguir, é calculada a energia final necessária ao funcionamento dos sistemas técnicos do edifício, consoante as suas respetivas eficiências. Finalmente, a energia a ser fornecida pela rede para fins de aquecimento, arrefecimento, ventilação e água quente para uso doméstico é calculada por recurso aos fatores de conversão de energia primária, estabelecidos a nível nacional ([16], [53]).

A influência positiva da produção de energia renovável deve ser tida em conta. Portanto, às necessidades de energia primária é deduzida a energia produzida no local, considerando cálculos específicos conforme a energia gerada, seja térmica ou elétrica.

Os resultados de desempenho energético das medidas devem referir-se ao consumo de energia primária e ser expressos em quilowatts equivalentes de petróleo, por metros quadrados de área útil de pavimento de cada edifício de referência [$\text{kWh}_{EP}/\text{m}^2$]. A Figura 2.11 mostra um exemplo da definição dos limites dos sistemas estabelecidos para avaliar o desempenho energético, com base em adaptação da EN ISO 15603:2008 [55].

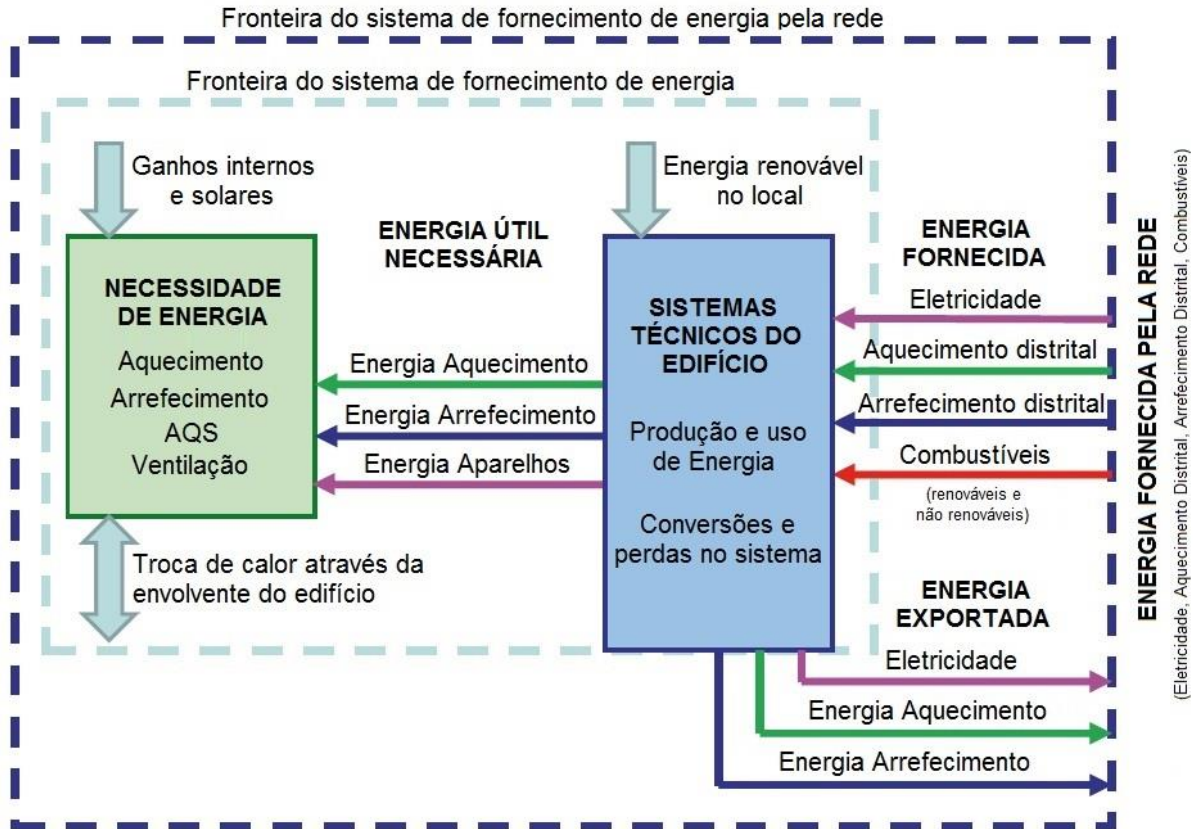


Figura 2.11. Limites dos sistemas estabelecidos para avaliar o desempenho energético (fonte: Kurnitski [55]).

O custo global respeitante aos edifícios e seus componentes é calculado pela soma dos vários tipos de custos, aos quais se deve aplicar a taxa de desconto, através de um fator de desconto, para que sejam expressos em termos do valor no ano inicial, acrescidos do valor residual descontado.

A determinação do custo global de cada medida na perspetiva financeira deve considerar preços efetivamente pagos pelo cliente, incluindo todos os impostos aplicáveis, nomeadamente IVA (Imposto sobre o Valor Acrescentado) e encargos.

De preferência, o cálculo deve também incluir as subvenções vigentes para as várias medidas, embora os Estados-Membros possam fazer uma opção diversa, caso em que deverão garantir não apenas a exclusão das subvenções e dos regimes de apoio às tecnologias, mas também de quaisquer subvenções para os preços da energia [11].

Na perspetiva financeira, o custo global, C_g , para o período τ , é calculado pela seguinte expressão:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \cdot R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad [\text{€/m}^2] \quad (8)$$

Em que:

τ Período de cálculo;

$C_g(\tau)$ Custo global (relativo ao ano inicial τ_0) no período de cálculo;

C_I Custos de investimento inicial para a medida ou conjunto de medidas j ;

$C_{a,i}(j)$ Custo anual no ano i para a medida ou conjunto de medidas j ;

$V_{f,\tau}(j)$ Valor residual da medida ou conjunto de medidas j no final do período de cálculo (em relação ao ano inicial τ_0);

$R_d(i)$ Fator de desconto no ano i , com base na taxa de desconto r a calcular a partir da seguinte expressão:

$$R_d(p) = \left(\frac{1}{1 + r/100} \right)^p \quad (9)$$

Sendo p o número de anos a partir do período inicial e r a taxa de desconto real.

A perspetiva macroeconómica busca contemplar o interesse comum e auxiliar os formuladores de políticas na criação de estratégias para remoção de barreiras e incentivo às medidas que atendam melhor os anseios da sociedade. Esta análise não inclui os encargos ou impostos, como o IVA, mas tem em conta os custos associados às emissões de gases com efeito estufa (GEE), sendo a metodologia de cálculo do custo global expressa pela equação [10]:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \cdot R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad [\text{€/m}^2] \quad (10)$$

Em que:

$C_{c,i}(j)$ Custo do carbono para a medida ou conjunto de medidas j durante o ano i .

A disposição dos diversos pacotes de medidas no gráfico proposto no Regulamento Delegado (UE) n.º 244 tende a apresentar uma curva de rentabilidade, onde é possível identificar uma faixa de rentabilidade ótima ou, sob outro ponto de vista, de custo ótimo, conforme pode ser observado na Figura 2.12.

No gráfico, está também representada uma faixa de soluções possíveis que reduzem significativamente as necessidades de energia primária, mas que também aumentam o custo global (níveis nZEB).

A comparação das diversas soluções possíveis com os requisitos atuais, pode permitir a identificação de lacunas financeiras e de necessidades de energia que devem ser compreendidas no contexto macroeconómico, principalmente para o estabelecimento de estratégias e políticas, o que inclui a revisão periódica da regulamentação.

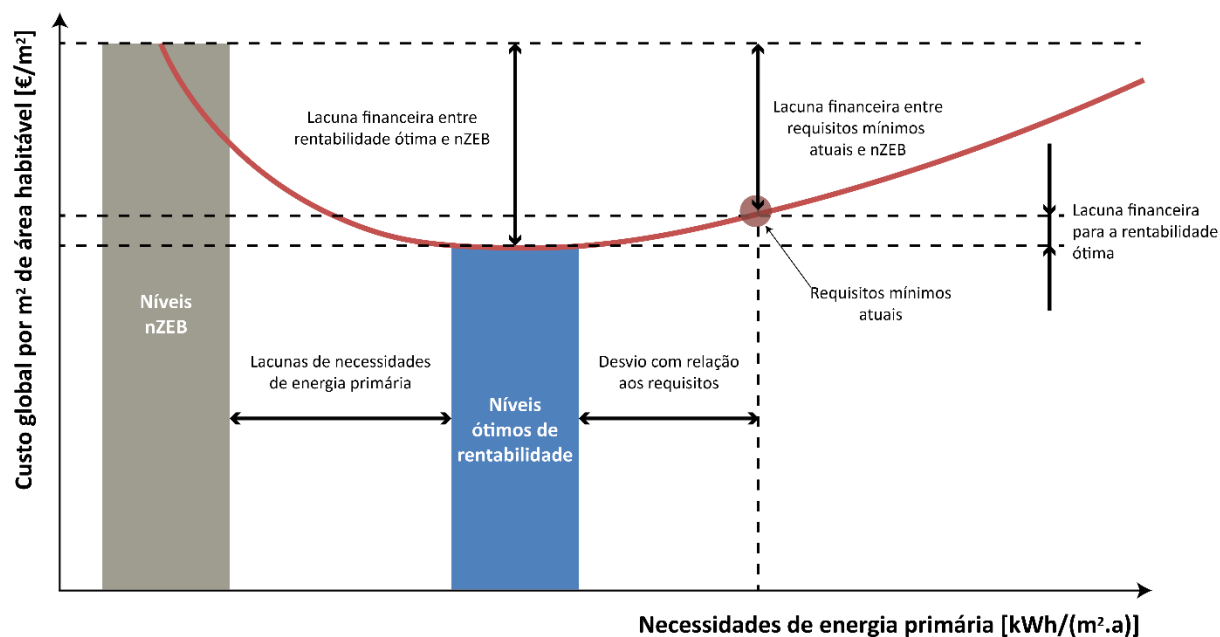


Figura 2.12. Curva de rentabilidade e as lacunas em relação aos nZEB e aos requisitos atuais (fonte: BPIE [56]).

A avaliação do custo global é feita em termos reais e exclui os efeitos da instabilidade da inflação. Efetivamente, isto significa que os chamados fluxos de caixa (movimentação de entrada e saída de capital) são estimados utilizando as taxas de crescimento real e sem considerar o aumento de preços oriundo de inflação. Deve-se realizar uma análise de sensibilidade da taxa de desconto utilizando, pelo menos, duas taxas para o cálculo macroeconómico e duas taxas para o cálculo financeiro. Uma das taxas de desconto a utilizar na análise de sensibilidade do cálculo macroeconómico deve ser de 3 %, sempre em termos reais [10].

Os Estados-Membros são incentivados a utilizar o anexo A da norma EN 15459:2007 [57], relativa aos parâmetros económicos dos componentes de edifícios, para a definição dos ciclos de vida económicos estimados dos componentes de edifícios em causa.

Em relação à previsão da evolução dos preços de energia, a serem considerados a longo prazo, nomeadamente as estimativas das tendências para o custo dos combustíveis e da eletricidade, a orientação é fornecida pela Comissão Europeia. Os dados são atualizados duas vezes ao ano e estão disponíveis em “*UE energy trends to 2050*” [58]. Também para o custo de energia é obrigatória uma análise de sensibilidade, a qual deve incluir diferentes cenários de evolução dos preços para todos os vetores de energia utilizados nos edifícios, no contexto nacional.

Na perspetiva macroeconómica é necessário calcular ainda o custo acumulado do carbono para cada medida definida. Para esse efeito, multiplica-se a soma das emissões anuais de GEE pelos preços previstos, por tonelada de CO₂-equivalente, das licenças de emissão de GEE geradas cada ano. Os valores mínimos vinculativos, por tonelada de CO₂, são € 20 até 2025, € 35 até

2030 e € 50 além desta data, de acordo com os cenários de preços do carbono, no Regime de Comércio de Licenças de Emissão da UE (RCLE-UE) [10].

O valor residual é calculado considerando-se a vida útil dos elementos da envolvente (isolamento e envidraçados) e sistemas, em relação ao período de cálculo. Isto é, no final do período de cálculo, se os elementos e sistemas ainda possuírem um tempo de vida útil, o valor residual atualizado correspondente a este período deve ser subtraído do custo global. Na prática, esta depreciação linear do valor residual faz com que os investimentos nas medidas não possuam qualquer valor, no final do período de cálculo. A Figura 2.13 ilustra um exemplo do cálculo do valor residual de uma componente de um edifício com um tempo de vida útil superior ao período de cálculo.

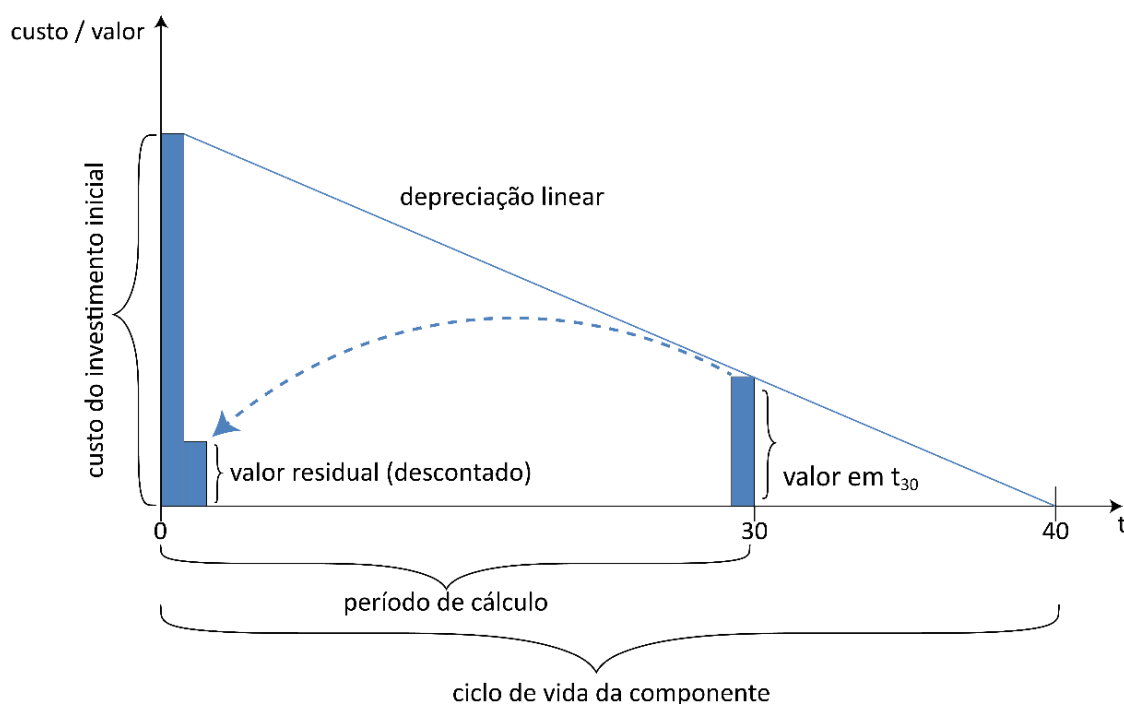


Figura 2.13. Cálculo do valor residual da componente de um edifício (fonte: CE [11]).

O Regulamento Delegado n.º 244 considera ainda que análises de sensibilidade adicionais podem abranger também outros parâmetros que apresentem impacto significativo nos resultados, como a variabilidade nos padrões de utilização do edifício ou a evolução dos preços dos produtos não energéticos, ao longo do período de cálculo [10].

Os níveis ótimos de rentabilidade são calculados na perspetiva macroeconómica ou na financeira [10]. Deve-se comparar o resultado do cálculo escolhido como padrão de referência nacional, entre estas duas perspetivas, com os requisitos de desempenho energético em vigor para cada categoria de edifícios. Se o resultado da comparação mostrar que os requisitos mínimos de desempenho energético em vigor são significativamente menos eficientes que os níveis ótimos de rentabilidade, deve-se obter uma justificação dessa diferença e, se esta não puder ser justificada, deve ser criado um plano de ações [10].

O nível significativamente menos eficiente é a diferença entre os requisitos mínimos de desempenho energético e o nível ótimo de rentabilidade, em função do cálculo utilizado como padrão de referência nacional de todos os tipos de edifícios de referência utilizados. Os requisitos mínimos não devem ser inferiores aos níveis ótimos de rentabilidade em mais de 15%.

Em cada caso, deve ser caracterizado o desempenho energético ótimo, do ponto de vista económico, em termos de energia primária, expresso em [kWh/(m².ano)] ou, caso se utilize uma abordagem centrada nos sistemas, na unidade pertinente, por exemplo, coeficiente U [59]. É altamente recomendado que eventuais incentivos fiscais e financeiros estejam condicionados ao cumprimento do resultado do cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade para os edifícios de referência

Os Estados-Membros estão obrigados a comunicar à Comissão Europeia todos os dados de entrada e os pressupostos utilizados para estes cálculos e os respetivos resultados. Devem apresentar os seus relatórios à Comissão em intervalos regulares de, no máximo, cinco anos, conforme previsto no artigo 6º do Regulamento Delegado n.º 244 [10].

Em julho de 2013, Portugal enviou o seu relatório [60] com dados e pressupostos utilizados para os cálculos de rentabilidade, em âmbito nacional. Tendo em vista o grande número de combinações medidas possíveis de serem adotadas, foi utilizado um procedimento baseado na técnica de simulação de Monte Carlo, para seleção destas medidas. Este relatório deveria incluir os resultados dos cálculos aos níveis macroeconómico e financeiro, mas somente este último foi realizado. Este estudo não contemplou custos de manutenção.

A análise de sensibilidade, referida nos artigos 3º, nº 5 do Regulamento Delegado n.º 244, a evolução prevista do preço da energia e do carbono e o uso de fontes de energia renováveis também não foram contemplados. Como este relatório se refere somente a edifícios novos, o que anualmente tem representado menos de 1 a 2% do parque edificado [36], a maior parte dos edifícios portugueses (existentes) não foi incorporado neste estudo. São apresentados resultados somente para a categoria dos edifícios residenciais.

O Decreto-Lei 118/2013 [16] veio estabelecer uma metodologia de apuramento da viabilidade económica, mas que somente se aplica a grandes edifícios de comércio e serviços, nas seguintes situações:

- Projeto e construção de edifícios novos;
- Grande intervenção na envolvente ou sistemas técnicos de edifícios existentes;
- Avaliação energética e da manutenção dos edifícios novos, sujeitos a grande intervenção e existentes, no âmbito do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE).

O Despacho 15793-L/2013, que complementa esta regulamentação [16], determina que os projetos dos grandes edifícios de comércio e serviços estejam condicionados à viabilidade

económica, sendo de implementação obrigatória quando o respetivo estudo demonstre que não existem constrangimentos ou limitações técnicas, legais ou administrativas à instalação e quando o período de retorno simples (PRS) seja igual ou inferior a oito anos.

Predomina o sentimento de que as grandes renovações de edifícios existentes são uma oportunidade para tomar medidas rentáveis de melhoria do desempenho energético. No entanto, principalmente os proprietários de grandes edifícios tendem a ir além da metodologia recomendada pela Comissão Europeia para cálculo de rentabilidade e dos critérios tradicionais de análise de investimentos, na avaliação de projetos de reabilitação energética.

O facto das “grandes renovações” citadas pela EPBD serem transpostas para o contexto português como alterações da envolvente e/ou sistemas técnicos iguais ou superiores a 25% do valor venal do edifício, atribui inegável relevância ao montante de capital investido. Isto faz com que uma análise de investimento, minimamente comprometida como a rentabilidade, não se restrinja a um mero estudo de PRS, tendo em vista que o montante de capital investido pode ser bastante representativo.

Uma vez identificada a forma de implementação da metodologia, segue-se a apresentação de estudos relevantes relacionados com o presente trabalho.

2.5 Estudos relevantes

Após a apresentação dos principais instrumentos de regulamentação, a nível europeu e português, segue-se a análise de alguns trabalhos relevantes no contexto da reabilitação energética de edifícios.

Em nível europeu, alguns estudos têm abordado o tema dos edifícios de referência. Em particular, dois projetos dentro do programa *Intelligent Energy Europe* (IEE), TABULA [61] e ASIEPI [62], tiveram uma posição de destaque no que diz respeito à definição dos edifícios residenciais típicos, mas importa referir que nenhum destes projetos incluiu Portugal.

O objetivo do projeto TABULA (*Typology Approach for Building Stock Energy Assessment*) foi o desenvolvimento de uma tipologia de construção harmonizada para os países europeus, examinando as diferentes experiências com padrões construtivos utilizados nas últimas décadas. O foco foi os edifícios residenciais e a energia consumida para aquecimento e água quente. Por exemplo, na Áustria este estudo pôde ser realizado com sucesso pela combinação de informações de Certificados de Desempenho Energético (CDE) disponíveis no banco de dados ZEUS, fontes de literatura e o micro censo nacional "edifícios e habitações". As etapas para gerar a tipologia de construção nacional da Áustria estão descritas em relatório [61].

A tipologia básica de construção, tal como definida e apresentada no catálogo, atraiu grande interesse para ser usada como uma base para outros projetos de investigação. Dentro do projeto, análises de cenários de determinação das necessidades de energia final nacional e potenciais de economia de energia, foram realizadas e comparadas com dados estatísticos de consumo

nacional. Os resultados das necessidades de energia final das análises de cenários TABULA aproximam-se muito de dados estatísticos nacionais [63].

Através da disponibilização de dados de todos os países participantes, as tipologias de construção nacionais são comparáveis entre si e suportadas com valores estatísticos, o que pode servir para projeções de economia de energia e análises de redução de CO₂, como base para políticas energéticas europeias. No longo prazo, estas tipologias poderão ser usadas para prever e avaliar a economia de energia e de potenciais reduções de emissões de dióxido de carbono de vários países europeus. Além da possibilidade de usar a tipologia como um instrumento para análise de potencial a nível regional e nacional, a tipologia do edifício pode ser usada para orientação inicial ou para tornar o usuário final ciente de renovações possivelmente necessárias.

Assim, o TABULA acabou por concluir que os CDEs são uma fonte promissora para obter informações sobre o desempenho energético dos estoques de construção nacionais. No entanto, uma vez que os CDEs são obrigatórios apenas quando se pretende que os edifícios sejam vendidos, alugados ou sujeitos a grandes obras de renovação, a informação não pode ser considerada representativa.

O objetivo principal do projeto ASIEPI (*Assessment and Improvement of the EPBD Impact*) foi o de elaborar sugestões para formuladores de políticas sobre como melhorar a qualidade e o impacto da regulamentação sobre o desempenho energético dos edifícios novos e na reabilitação de existentes em relação a seis tópicos específicos, de entre eles a comparação dos níveis dos requisitos de desempenho energético.

Para desenvolver um método comparativo dos níveis de exigência de desempenho energético, vários passos foram tomados, como o desenvolvimento de um conjunto de edifícios de referência e estudos-piloto diversos, resultando em aprendizagem sobre as possibilidades da comparação e fornecendo uma primeira impressão transversal de níveis de exigência de desempenho energético na Europa. Estes passos resultaram em três tópicos principais:

- Os aspetos principais do método de comparação, assim como o índice de severidade do clima usado no método;
- A impressão geral sobre os níveis de exigência de desempenho energético na Europa, mesmo sabendo que não é possível uma visão robusta, nesta fase;
- A descrição do conjunto de construção de referência europeu, que inicialmente foi desenvolvido para ser utilizado no método de comparação, mas é útil para um amplo cálculo de energia e de estudos de comparação em geral, a nível europeu.

Além do relatório final, três relatórios de trabalho e uma ferramenta Excel ® foram publicados. Num deles, "Edifícios de referência para estudos de cálculo de desempenho energético", publicado em 2009, mostra-se que a escolha da geometria do edifício é, muitas vezes, uma das primeiras determinações durante estudos de comparação de níveis de desempenho energético

na Europa. Isto também se verifica no âmbito de outros estudos como, por exemplo, os apresentados no artigo P158, sobre um conjunto de edifícios de referência para estudos europeus de cálculo de desempenho energético [64].

Assim, uma das tarefas do ASIEPI foi a de reunir um conjunto de edifícios de referência para dar uma ideia de construções típicas da Europa. Quando são realizados cálculos, a nível europeu, muitas vezes extrapolam-se os resultados de uma residência, mesmo que uma moradia na Finlândia possa parecer totalmente diferente de uma moradia na Espanha. É claro que não é possível determinar uma única residência típica para cada um país. Logo, o relatório do ASIEPI dá informações sobre a variedade de edifícios típicos na Europa, no entanto, uma vez que incide principalmente sobre a escolha da geometria de construção, seus resultados são limitados.

A Itália participou em ambos os projetos e forneceu alguns resultados relevantes. Uma profunda pesquisa sobre o parque italiano de edifícios de escritórios foi realizada em 2009, pela Agência Nacional Italiana para Novas Tecnologias, Energia e Desenvolvimento Económico Sustentável (ENEA) e finalizada com a análise quantitativa e qualitativa do estoque italiano de edifícios comerciais. A análise realizada pela ENEA definiu dois edifícios de referência para o parque existente, em três zonas climáticas principais (Norte, Centro, Sul e Ilhas) e reuniu-os de acordo em cinco períodos diferentes de construção (pré-1920, 1920-1945, 1946-1971, 1972-1991, pós-1992) [63].

Foi adotada uma estrutura de quatro subconjuntos de características que é demonstrada na Figura 2.14 e que tem como inspiração a metodologia para o estabelecimento de edifícios de referência utilizada pelo Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos. Os modelos criados surgem de uma base de dados de análise estatística e representam a primeira tentativa de obter uma visão detalhada do estoque de edifícios não-residenciais da Itália.

Em Portugal, a DGEG é responsável por enviar o quadro metodológico da rentabilidade ótima [10], o que impõe a definição de um conjunto de edifícios de referência para atender as exigências relativas a estes estudos de rentabilidade. As características geométricas e térmicas de edifícios novos e existentes têm sido definidas com base na compilação realizada pela Agência para a Energia (ADENE). O banco de dados do Sistema de Certificação Energética (SCE) possibilita uma sólida análise estatística de mais de 800 mil CDEs. São também utilizados os dados estatísticos de inquéritos a residentes fornecidos pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) e pela DGEG [17].

Com base nestas fontes de informação, a Universidade do Minho [65], o Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons) [66] e outras instituições [67] têm colaborado com a ADENE e a DGEG no sentido de se estabelecer os edifícios de referência a serem utilizados nos estudos de rentabilidade, em Portugal.

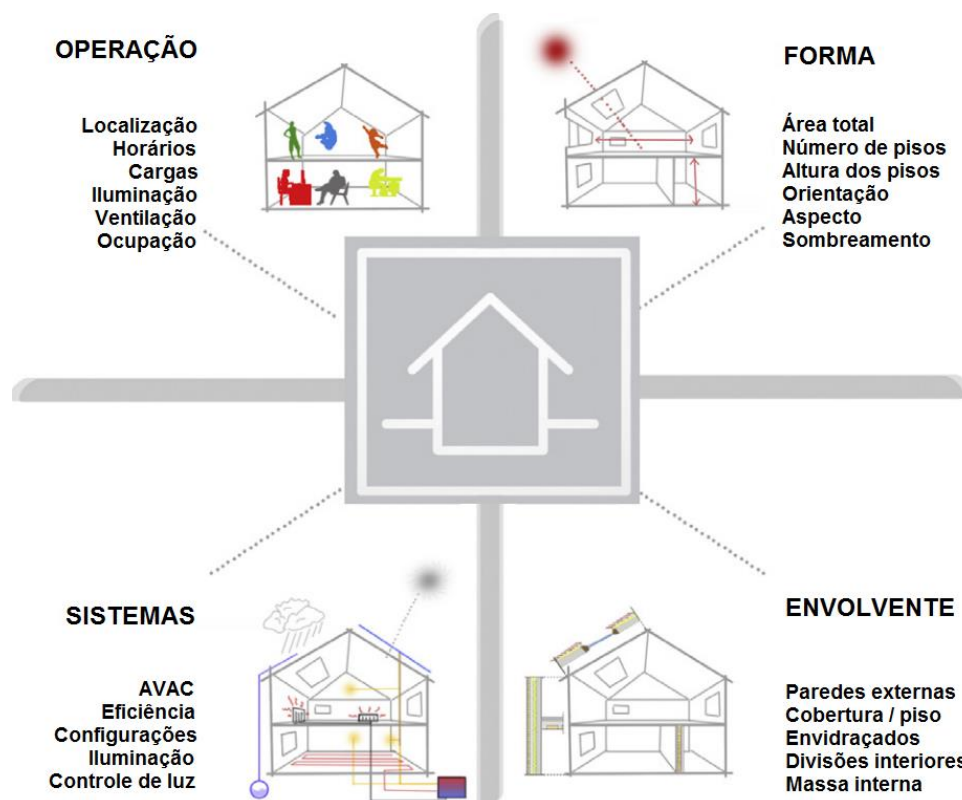


Figura 2.14. Quatro subconjuntos de funcionalidades para definição de modelos edifícios de referência, de acordo com a metodologia DOE (fonte: Corgnati [63]).

Tais estudos disponibilizaram dados bastante abrangentes, não só sobre as características construtivas mais comuns dos edifícios, como também de sistemas técnicos e hábitos de climatização, em Portugal. A amostra obtida foi dividida de acordo com a data de construção dos edifícios, nos seguintes períodos: anteriormente a 1960, de 1961 a 1990, de 1991 a 2013 e novos, servindo de referência para artigos recentes ([65], [66], [67]).

Ana Vasconcelos *et al.* [67] criaram um modelo que gerou um edifício unifamiliar e uma unidade em edifício multifamiliar, ambos do período de construção entre 1961 e 1990. A metodologia proposta para a definição de edifícios de referência consiste na criação de um edifício virtual que, para cada parâmetro relevante, inclui a maioria dos materiais e sistemas comumente usados, fazendo uso de dados estatísticos. Ocasionalmente, quando não há informação estatística suficiente para um determinado parâmetro, especialistas na área ou outras fontes de informação são consultadas.

Marco Ferreira *et al.* [65] geraram um edifício multifamiliar típico do parque habitacional Português, construído pouco antes da aplicação do regulamento térmico primeiros em 1990. Embora os resultados apresentados refiram-se apenas a um único tipo de construção e localização, algumas conclusões gerais foram obtidas no sentido de melhorar o desempenho energético da envolvente do edifício, dos sistemas de aquecimento, arrefecimento e de preparação de AQS, além usar produção local de energia renovável para alcançar um balanço de energia quase nulo.

As características dos edifícios ao longo do tempo diferenciam-se em função dos aspetos sociais, tecnológicos e regulamentares. Em Portugal e antes de 1960, era recorrente a construção de habitações com alvenaria de pedra. Após esta data, as paredes exteriores passaram a ser constituídas por tijolo vazado não estrutural, solução que continua a ser a mais utilizada até hoje. As janelas em madeira foram a principal opção, até à década de 70. Até à década de 80, as coberturas eram em geral inclinadas com telhas cerâmicas colocadas sobre uma estrutura de madeira, permitindo a ventilação no desvão e sem qualquer isolamento [68]. Só a partir de 1990, com a publicação do Decreto-Lei n.º40/90 (RCCTE) [50], é que os edifícios passaram a apresentar diferenças significativas decorrentes de exigências regulamentares de comportamento térmico.

Num dos estudos do *Building Performance Institute Europe* (BPIE) discute-se que amplitude intervenções pode ser considerada uma "reabilitação energética". O termo "renovação" tem sido utilizado por diferentes investigadores para descrever uma ampla variedade de melhorias para um edifício existente. Qualitativamente, nota-se que a renovação da fachada de um edifício (paredes exteriores e janelas) propicia um nível diferente de poupança de energia do que a abordagem de toda a envolvente do edifício e os seus sistemas de energia (climatização, ventilação, iluminação, etc.), bem como o uso de FER. Existe, portanto, uma necessidade de se estabelecerem diferentes níveis de renovação [8].

Basicamente, o desempenho energético de um edifício pode ser melhorado com a aplicação de uma única medida, como a implementação de uma nova caldeira ou o isolamento da cobertura. Normalmente, este tipo de medidas poderia ser chamado de "reabilitação energética", embora se trate de uma "renovação menor". Tipicamente, a economia de energia de até 30% pode ser alcançada pela adoção de 1 a 3 medidas de baixo custo ou de fácil implementação [8].

A renovação pode envolver a substituição total ou atualização de todos os elementos que têm uma influência sobre o consumo de energia, bem como a instalação de tecnologias de energias renováveis, a fim de reduzir os níveis de consumo de energia e as emissões de carbono para quase zero, ou, no caso de uma "energia positiva" edifício, para menos do que zero (isto é, uma construção que produz mais energia a partir de FER do que consome, num ciclo anual).

A redução das necessidades energéticas a níveis de energia muito baixos (ou seja, os padrões das casas passivas, abaixo de 15 [kWh/(m².a)]) evitará a obrigatoriedade de utilizar-se um sistema de aquecimento tradicional. Este é considerado como sendo um ponto de paragem em que a proporção de benefícios (poupança de custos com energia) em relação aos custos de investimento atinge um máximo. Estas renovações elevam o edifício à condição de necessidades quase nulas de energia (nZEB) [8]. Entre estes dois exemplos estão as reformas que envolvem uma série de melhorias. Estes podem ser subdivididos em "Moderado", envolvendo 3 a 5 medidas, resultando em reduções de energia do intervalo 30-60%, e "Profunda" (60-90%). Uma reforma profunda normalmente adota uma abordagem holística, encarando a renovação como um pacote de medidas que trabalham em conjunto [8].

A Tabela 2.14 resume as quatro categorias de renovação, juntamente com os custos totais médios de investimento para medidas de eficiência energética, expresso em [€/m²] de área útil. Os custos refletem os custos totais das medidas adotadas, ou seja, materiais, mão-de-obra e honorários profissionais, mas não incluem quaisquer custos não diretamente relacionados com a melhoria do desempenho energético dos edifícios.

Tabela 2.14. Tipos de renovação e estimativas de custo (fonte: BPIE [8]).

<i>Descrição (tipo de renovação)</i>	<i>Energia final (% de economia)</i>	<i>Poupança indicativa (para modelagem)</i>	<i>Custo médio (total em [€/m²])</i>
Menor	0-30%	15%	60
Moderada	30-60%	45%	140
Profunda	60-90%	75%	330
nZEB	90%+	95%	580

Na maioria dos estudos de reabilitação energética, a estimativa das necessidades de energia baseia-se no método sazonal descrito na EN ISO 13790:2008 [69]. Este procedimento impõe a definição de graus-dias (GD) e de valores médio de radiação solar ([70], [71]). Fokaides e Papadopoulos [70] afirmam que o método GD é o mais simples para a análise de energia e é apropriado se o uso do edifício e as eficiências dos sistemas são constantes. A severidade do clima pode ser caracterizada de forma concisa em termos de GD. Além disso, o método GD pode fornecer uma estimativa simples de cargas anuais se a temperatura e os ganhos internos são constantes e se os sistemas de climatização funcionam durante toda a estação.

No entanto, destacam alguns pontos fracos no método GD que podem introduzir certo grau de incerteza e imprecisão na estimativa da espessura ideal do isolamento. O método GD assume que temperatura do ponto de equilíbrio é constante, o que é frequentemente verdadeiro, na prática. Ganhos solares são zero à noite, e os ganhos internos tendem a ser mais altos durante a noite. Apesar disso, sistemas de ar condicionado são muitas vezes desligados durante os períodos desocupados. Por esta razão, o método baseado em graus-horas pode ser considerado como o mais adequado em cálculos que exigem muita precisão, em que pese que esta diferença tenha uma influência limitada nos resultados de estudos de rentabilidade.

Já os fatores de conversão de energia final para energia primária constituem um parâmetro bastante relevante nos cálculos de rentabilidade. Para a eletricidade, de uma forma geral, este fator representa a eficiência média de todas as centrais de energia elétrica e a participação das fontes renováveis na sua produção. Quanto maior a utilização de energias renováveis, menor deverá ser o fator de conversão de energia primária. A eletricidade tem, geralmente, o maior fator de energia primária de entre as fontes de energia, devido à baixa eficiência de centrais de produção de energia que em média está em torno de 35%. O cálculo deste fator é muito complicado e, raramente, os detalhes exatos do algoritmo são publicados [72].

A Tabela 2.15 lista os fatores de conversão de sete países europeus para fornecimento de energia a um edifício de acordo com os seus regulamentos nacionais de edifícios, em 2011. Os fatores para a maioria dos países é de aproximadamente 2,6, próximo do valor de Portugal, que é igual a 2,5.

Tabela 2.15. Fatores de conversão de eletricidade em energia primária em [kWh_{EP}/kWh] (fonte: Ecofys [72]).

	<i>Alemanha</i>	<i>Espanha</i>	<i>França</i>	<i>Holanda</i>	<i>Polónia</i>	<i>Suécia</i>	<i>UK</i>
% FER	10,3	22,3	12,8	4,2	2,7	50,2	4,7
Fator de conversão	2,60	2,60	2,58	2,56	3,00	2,00	2,92

O setor elétrico é dinâmico e estes valores devem ser regularmente revisados, por exemplo, a cada 3 ou 5 anos. É de se supor que as decisões políticas têm uma grande influência sobre o valor final. Por exemplo, na Alemanha, o fator de conversão para eletricidade foi alterado de 2,60 para 2,40 em 2014 (DIN V 18599-1) e espera-se que mude para 1,80, em 2016, com um fator de 1,20 como meta para o ano de 2020 (EnEV 2014 “*Energy Saving Regulation in Germany*”). Considerar fatores de conversão de eletricidade tão baixos pode favorecer o uso de energia elétrica e estimular o desuso de combustíveis fósseis. Isto tem impactos económicos, mas também ambientais.

As necessidades de energia primária representam o vetor ambiental do Regulamento Delegado (UE) n.º 244/2012 [7], juntamente com os custos adicionais atribuídos às emissões de GEE, na perspetiva macroeconómica. No entanto, o vetor de avaliação ambiental desta metodologia é limitado e não representa uma perspetiva de ciclo de vida. A análise de ciclo de vida (ACV) aborda os potenciais impactos ambientais causados pelo ciclo de vida de produtos e sistemas [73]. A ACV pode identificar os componentes críticos no desempenho ambiental dos edifícios existentes e avaliar o potencial benefício de diferentes pacotes de eficiência energética.

As avaliações ambientais e económicas têm sido principalmente aplicadas a produtos e/ou serviços (por exemplo, sistemas de energia, materiais, etc.) e, recentemente, também a edifícios ([74], [75], [76]). Vários estudos têm realizado uma avaliação económica das medidas de reabilitação energética, mas muito poucos incluem uma avaliação ambiental dos edifícios existentes, ainda menos para edifícios históricos. Por exemplo, Lollini *et al.* [77] estudaram a otimização de componentes da envolvente opaca em relação aos seus impactos energéticos, ambientais e económicos.

Anastaselos *et al.* [78] criaram uma ferramenta para executar uma avaliação integrada energética, ambiental económica das soluções de isolamento térmico. Kim *et al.* [79] avaliaram as emissões de carbono e os custos relacionados de edifícios de apartamentos e Kneifel [80] avaliou medidas de eficiência energética em edifícios comerciais novos. No contexto

Português, Silvestre *et al.* [81] realizaram uma avaliação energética, ambiental económica de conjuntos de edifícios para novas habitações.

A simulação dinâmica térmica tem sido incluída em estudos de ACV para avaliar o potencial contributo das preferências dos ocupantes não só no uso de energia operacional de edifícios, mas também para os *trade-offs* entre energia operacional e incorporada [82]. O nível de ocupação de um edifício influencia o uso de energia operacional e a contribuição das diferentes etapas para o ciclo de vida total de um edifício ([82], [83]). De Meester *et al.* [84] e Azar & Menassa [85] sublinharam a necessidade de ter em conta a ocupação na fase de projeto, para se chegar a estimativas de desempenho energético de edifícios mais confiáveis.

Para a análise da rentabilidade económica importa contabilizar e analisar as várias combinações de possíveis intervenções a utilizar na reabilitação do edificado. As principais medidas de reabilitação de um edifício residencial resumem-se, quase sempre, à aplicação de isolamento térmico na envolvente opaca, à substituição de vãos envidraçados e à substituição de sistemas de climatização e de preparação de águas quentes sanitárias por equipamentos mais eficientes. Muitos estudos centram-se na determinação da rentabilidade deste tipo de intervenções, quer aplicadas de forma isolada, quer em conjunto.

A determinação da espessura ótima de isolamento da envolvente dos edifícios e o seu efeito no consumo de energia tem sido objeto de estudo de muitos investigadores [86]. O isolamento térmico é um dos materiais mais utilizados em reabilitação energética, sendo que reduz as perdas de calor na estação de aquecimento e também os ganhos na estação de arrefecimento, proporcionando um maior conforto térmico no interior do edifício. O aumento da resistência térmica da envolvente opaca pode reduzir significativamente os consumos energéticos de climatização.

Contudo, uma solução com elevada espessura de isolamento pode não ser desejável, perante questões arquitetónicas e funcionais [87]. Além disso, o benefício económico de intervenções de melhoria para cada elemento da envolvente depende, não só do investimento envolvido, mas também do custo de operação do sistema de aquecimento e arrefecimento, em termos globais. Assim, o aumento de isolamento térmico pode representar uma influência reduzida na economia de energia utilizada para aquecimento ou arrefecimento ambiente e não representar a solução com maior rentabilidade [13].

Em Portugal no entanto, apenas 21,1% dos alojamentos possuem isolamento nas paredes exteriores e 17% dispõem de isolamento na cobertura [17]. Marta Panão [88] investigou o consumo de energia num conjunto de edifícios localizados em Lisboa catalogados por época de construção, incluindo edifícios reais e teóricos. Embora os casos de estudo selecionados não sejam edifícios de referência nacionais, foi possível verificar o potencial de redução das necessidades de energia primária em função da época de construção dos edifícios. Foi realizada uma análise de rentabilidade de soluções de reabilitação que indicou como espessuras ótimas

de isolamento 0,04-0,06 [m], para fachada e cobertura. A este estudo não foi adicionada qualquer análise de sensibilidade.

Na Grécia, Ioannis Axaopoulos *et al.* [89] determinaram a espessura ótima de isolamento de paredes exteriores num edifício residencial, em função da orientação, direção do vento e posição do isolamento na parede. As necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento foram obtidas por simulação dinâmica horária, onde consideraram a influência do vento através do coeficiente de transferência de calor por convecção, resultando em espessuras ótimas entre os 0,07 e 0,10 [m]. Concluíram que ventos prevalentes do norte favorecem a parede orientada a norte na estação de arrefecimento, contudo incrementam significativamente os consumos no inverno. A parede orientada a sul é a que possui menos necessidade de aquecimento, enquanto a parede orientada a oeste possui o valor com maior consumo de arrefecimento. A colocação de isolamento térmico pelo exterior revela-se mais rentável.

Outros autores estudaram a combinação de diferentes medidas de eficiência energética. G. Verbeeck e H. Hens [90] investigaram a viabilidade económica de medidas de reabilitação energética em cinco habitações representativas do parque edificado belga. O dimensionamento do sistema de aquecimento está diretamente relacionado com a qualidade da envolvente. Assim, numa primeira fase, estudaram soluções de redução de consumos dos edifícios, com recurso a isolamento da envolvente e melhoria dos envidraçados e, numa segunda fase, combinaram essas medidas com sistemas mais eficientes. Para quantificação dos custos, consideraram um ciclo de vida de 30 anos. Concluíram que é benéfico investir em primeiro lugar no isolamento, e sugeriram a seguinte ordem de importância:

- Isolamento na cobertura;
- Isolamento no pavimento, se facilmente aplicável;
- Melhoria no desempenho dos envidraçados (no caso de reabilitação, os caixilhos devem ser sempre substituídos);
- Sistemas de aquecimento mais eficientes;
- Sistemas de energias renováveis.

Fokaides e Papadopoulou [70] consideraram importante ter em conta investimentos adicionais provocados pela necessidade de mudanças físicas no edifício, resultantes de uma alteração na espessura do isolamento. Assim, pode-se prever que haverá uma variação custo de investimento quase-linear. A Figura 2.15 ilustra a definição dos níveis ótimos de rentabilidade para espessuras de isolamento para os componentes do edifício, considerando o custo de investimento quase linear. É possível deduzir que o aumento da espessura do isolamento pode maximizar o lucro apenas na ausência de alterações físicas no edifício. Apesar disso, um efeito positivo do aumento da espessura do isolamento é uma menor necessidade de energia que, conseqüentemente, requer uma capacidade inferior do sistema de aquecimento no edifício.

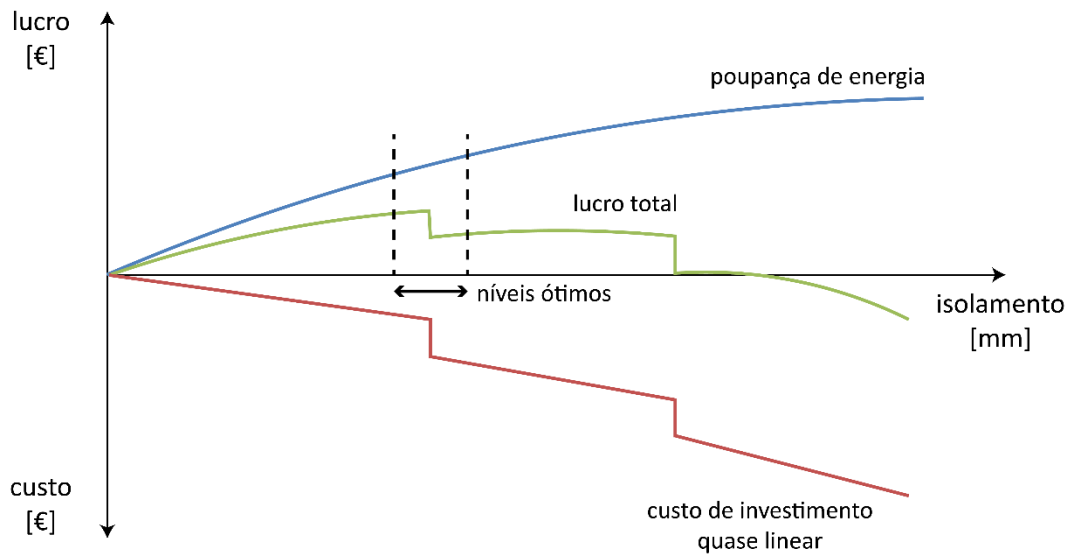


Figura 2.15. Definição de espessura do isolamento ótimo de rentabilidade para os elementos de construção considerando o custo de investimento quase linear (fonte: Fokaidis [70]).

Os estudos sobre a influência das janelas no desempenho energético dos edifícios e em diferentes regiões climáticas ainda são escassos. Na maioria dos trabalhos sobre a envolvente dos edifícios, o tema dos envidraçados é retirado do contexto ou tratado de forma superficial [70], pois trata-se de uma matéria controversa onde é difícil estabelecer-se uma regra geral.

A seleção das janelas mais adequadas implica estabelecer um equilíbrio entre dois parâmetros: o coeficiente de transmissão térmica e o fator solar do vidro. Este equilíbrio depende da variação das condições climáticas no decorrer do ano: durante a estação de aquecimento, um coeficiente de transmissão térmica baixo reduz as perdas de calor para o exterior e um fator solar alto aumenta os ganhos obtidos através da radiação; já na estação de arrefecimento, a situação inverte-se, pois é mais vantajoso dispor de vidros com fator solar baixo, para diminuir ganhos e favorecer a manutenção de temperaturas mais amenas no interior do edifício. Além destes parâmetros, há que ter em conta a localização geográfica do edifício, a relação entre área de envidraçados e área de pavimento em cada compartimento, a sua orientação e, principalmente, a utilização apropriada dos sistemas de oclusão.

O elevado investimento inicial em tecnologias mais eficientes e sistemas renováveis, pode contudo, suscitar algumas dúvidas para o cidadão comum. Com base na análise de um caso de estudo em Milão, N. Aste *et al.* [91] demonstraram que um edifício de energia zero pode apresentar um custo de investimento acessível, especialmente se incluir a energia fotovoltaica. Em Itália, a produção dos sistemas fotovoltaicos varia entre 1000-1500 [kWh/kWp]. Tendo em conta estes valores, a área necessária de painéis para atingir o objetivo nZEB varia entre 15 a 20% da área total aquecida. Esta avaliação mostra como, com uma área relativamente pequena de módulos solares, o conceito nZEB pode se tornar viável. Considerando uma taxa de desconto de 4%, um incremento anual de custos de energia de 3% para a eletricidade e 4% para o gás

natural, e aplicando as tarifas bonificadas que o governo definiu, verificaram que o sistema fotovoltaico pode gerar anualmente cerca de € 650/kWp em 20 anos. Com o incentivo das taxas bonificadas na venda de energia à rede, o período de recuperação diminui de 18 anos para menos de 14 anos.

Atendendo o que exige o Regulamento Delegado n.º 244 [10], Alemanha, Áustria e Polónia apresentaram seus respetivos relatórios à CE, contendo todos os dados e pressupostos utilizados nos cálculos de rentabilidade, bem como os seus resultados. Uma parte destes relatórios está documentada num dos estudos do BPIE [56]. De seguida, apresenta-se os aspetos mais relevantes do estudo.

Os cálculos realizados pela Alemanha, na perspetiva financeira, revelam que os pacotes de medidas de rentabilidade ótima indicam necessidades de energia primária ao redor de 53 [kWh/(m².ano)], para edifícios novos. Os requisitos mínimos de desempenho energético, então em vigor, poderiam ser ajustados em cerca de 15% para alcançar os níveis ótimos de rentabilidade. Os cálculos mostraram também que taxas de desconto mais baixas (representando menor custo de capital), em interação com maior custo de energia, favorecem o desempenho económico de pacotes de medidas com menores necessidades de energia primária, o que também acentua a diferença entre os níveis ótimos de rentabilidade e os requisitos mínimos estabelecidos a nível nacional.

A Áustria realizou uma análise de sensibilidade com diferentes premissas, incluindo o aquecimento distrital, bastante difundido neste país. Esta análise detetou uma lacuna entre os requisitos atuais e os níveis ótimos de rentabilidade de desempenho energético de 10,5% a 14,5%. Porém, para pacotes de medidas contendo outros tipos de sistemas de aquecimento (biomassa, ventilação, sistemas solares) a diferença entre os requisitos atuais e os verificados nos níveis ótimos de rentabilidade aumentou de 15,4% a 21,6%.

De entre estes países, a Polónia detetou a maior diferença entre os requisitos atuais e os níveis ótimos de rentabilidade. Os cálculos para diferentes localidades revelaram forte influência das condições climáticas sobre as necessidades de energia primária, sem no entanto alterar os pacotes de rentabilidade ótima.

Nestes países, foi possível constatar que os cálculos macroeconómicos e financeiros conduzem aos mesmos pacotes de rentabilidade ótima. Também é fácil concluir que os níveis ótimos de rentabilidade estão dependentes do estabelecimento dos edifícios de referência, da seleção de soluções, das taxas de desconto, entre outras premissas, gerando uma enorme quantidade de combinações possíveis, dificultando a implementação do quadro metodológico [56].

É evidente que a infinidade de soluções e possibilidades constitui um entrave a adoção de medidas de eficiência energética e o uso de energias renováveis em edifícios, principalmente num ambiente de desinformação. O proprietário que pondera investir na reabilitação energética do seu edifício, e que assume o ponto de vista do investidor, terá dificuldades em tomar uma decisão. Normalmente, as pessoas têm de estar absolutamente convencidas de que este

investimento será mais rentável do que investir em outros setores da economia ou, simplesmente, manter suas poupanças na banca. Isso é potencializado quando não existem poupanças e é necessário recorrer a linhas de crédito.

Muitos proprietários têm dúvidas se o eventual investimento em medidas de eficiência irá contribuir para a valorização do seu edifício. No entanto, é muito difícil precisar esta agregação de valor ao património. Estudos recentes indicam que a eficiência energética e certificação energética produzem benefícios tangíveis reconhecidos pelo mercado imobiliário. Estudos realizados nos Estados Unidos e na UE desaprovam a hipótese de que não há nenhuma relação entre o valor de mercado de um ativo imobiliário e sua eficiência energética.

Popescu *et al.* [92] desenvolveram métodos a serem utilizados na análise financeira de medidas de eficiência energética que quantificam o valor acrescido devido ao melhor desempenho energético, e argumentaram que, uma vez que existem provas confiáveis, este valor pode ser considerado nas políticas energéticas. Quando este parâmetro é incluído, os períodos de retorno de investimentos em medidas de eficiência energética diminuem.

Na Grécia, Nikolaidis *et al.* [93] avaliaram a rentabilidade de medidas de eficiência energética numa habitação isolada na Grécia central, considerada como edifício representativo do parque edificado desta região. No entanto, esta habitação não é tida como um edifício referência no âmbito nacional. As diversas soluções estudadas foram classificadas de acordo com a sua relevância económica.

Foi considerada a aplicação de isolamento de poliestireno extrudido (XPS) na cobertura, nas paredes exteriores e no pavimento, a substituição de janelas, de sistemas de aquecimento, de arrefecimento e de preparação de AQS. Além disso, foram estudados os benefícios da utilização de um controlador automático de temperatura e de melhorias no sistema de iluminação do edifício.

Para avaliação do investimento, utilizaram os quatro critérios mais comuns para realizar avaliação económica de medidas: o Valor Atualizado Líquido (VAL), o período de recuperação atualizado, a taxa interna de retorno (TIR) e o rácio poupança sobre investimento. Concluíram que a medida de poupança de energia mais efetiva é a modernização do sistema de iluminação, o isolamento da cobertura e a colocação de controladores automáticos de temperatura, por esta ordem. Contudo os resultados dependem do método de avaliação económico utilizado. A utilização de energia solar para preparação de AQS é rentável. A substituição de janelas apresentou TIR reduzida.

Kumbaroğlu e Madlener [94] investigaram o ótimo económico de várias medidas de reabilitação de um edifício administrativo de 1900, na Alemanha. Diversas alternativas de investimento foram estudadas e concluíram que os preços de energia têm uma importância significativa na avaliação de investimentos em reabilitação.

O critério de decisão e avaliação da rentabilidade do Valor Atualizado Líquido (VAL), também escolhido pela Comissão Europeia, é um dos indicadores mais confiáveis para a avaliação deste tipo de opções de investimento [12]. No Regulamento Delegado n.º 244/2012 [10], a seleção de medidas de eficiência sob o critério do VAL considera *cash flows* para um determinado horizonte temporal, por exemplo, 30 anos para edifícios residenciais, com os respetivos custos sendo atualizados para o momento presente.

Uma vez que a taxa de desconto utilizada para o cálculo é estabelecida em função do grau de risco dos fluxos de caixa estimados, com taxas mais elevadas para ativos mais arriscados e taxas mais baixas para projetos mais seguros, nos estudos de rentabilidade é pertinente considerar percentuais mais elevados em contextos onde existam dificuldades para financiar dívidas. Por exemplo, no âmbito macroeconómico, Portugal costuma oferecer taxas de juros mais altas, ao refinar a sua dívida, em comparação com a média da UE-28 (28 países da União Europeia) [95]. Este custo de captação de recursos no mercado financeiro, para pagamento da dívida soberana, tende a se estender ao cidadão comum.

No âmbito privado, uma baixa taxa de desconto, decorrente de baixa taxa de risco, deve ser ajustada para refletir as diferenças de fluxo de caixa e risco financeiro entre os vários perfis de proprietários de edifícios. Assim, fatores de desconto ajustados devem fornecer uma medida indireta do risco, em função das diferenças entre receitas de proprietários [96]. No caso da reabilitação energética de edifícios, as taxas de desconto devem refletir custos reais de capital, por exemplo os oferecidos em hipotecas de longo prazo ou, em caso de autofinanciamento, o retorno mínimo esperado sobre o investimento, por exemplo em poupança.

O investimento em reabilitação energética de edifícios pode ser considerado de baixo risco, mas também de pouca ou nenhuma liquidez. O montante normalmente investido é bastante representativo, quando comparado com o valor venal do edifício. Uma estimativa equivocada de poupanças futuras com energia pode acarretar dificuldades, principalmente quando o proprietário se vê obrigado a recorrer a fundos externos. Embora os financiamentos voltados para reabilitação não sejam pagos, via de regra, diretamente pelas poupanças de energia propiciadas pela implementação de medidas e sim por outros meios, a frustração de expectativas de retorno do investimento torna-se bastante desestimulante, sobretudo ao tratar-se de comprometimento de capital por um longo prazo.

A análise de sensibilidade proposta pela CE [10] é uma técnica simples e útil na avaliação do risco e da incerteza deste tipo de investimento, mas a exigência restringe-se a duas componentes do cálculo de rentabilidade: taxa de desconto e evolução dos preços de energia. Além disso, segundo esta metodologia, bastam dois cenários para cada uma destas componentes em ambas as perspectivas (financeira e macroeconómica), o que não atende a uma análise mais apurada, pois carece de exatidão.

Uma alternativa é a técnica de simulação de Monte Carlo que calcula o valor esperado e a dispersão (desvio padrão) de uma variável (por exemplo, *cash flow*), considerando a faixa de

variação e a distribuição de probabilidade de um conjunto de parâmetros incertos. No entanto, esta técnica não faz qualquer distinção entre incerteza técnica e incerteza económica. Assim, usá-la para determinar taxas de desconto com o objetivo de tomar a decisão ótima torna-se inadequado. Contudo, não a impede de ser utilizada como ferramenta auxiliar ao processo de tomada de decisão.

As árvores de decisão representam uma tentativa de considerar alternativas existentes ao longo do tempo, num processo decisório. É uma forma gráfica que se utiliza para representar um conjunto de decisões sequenciais, isto é, uma situação em que decisões são tomadas por ordem cronológica e em que as alternativas disponíveis ao decisor dependem de condições incontrolláveis e das decisões tomadas anteriormente. Entretanto, o facto da taxa apropriada de desconto não ser constante, na presença de opções, representa uma dificuldade.

No âmbito da reabilitação energética de edifícios, uma análise sob a ótica da Teoria das Opções Reais torna-se fundamental, pois existem questões de irreversibilidade e possibilidade de diferimento associadas ao investimento. Critérios tradicionais de análise de investimentos como o VAL tendem a subestimar o seu valor, por não incorporarem no seu processo de cálculo a questão da flexibilidade operacional e outros fatores estratégicos, em particular a possibilidade de diferimento [97].

Embora se fique comprometido por um longo período com uma determinada solução após a sua adoção, existe a possibilidade de se alterar antigas decisões, quando a conjuntura e/ou a oferta de tecnologia se modificam. Por exemplo, sistemas de aquecimento, sejam eles convencionais ou baseados em energias renováveis, podem ser substituídos por outras alternativas no final do seu ciclo de vida, inferior ao período de 30 anos recomendado pela CE, para o ciclo económico dos edifícios residenciais.

O valor desta flexibilidade torna-se claro quando nos questionamos sobre o quanto poderá evoluir a tecnologia empregue nestes sistemas, nos próximos 20 anos. Com o passar do tempo, também os custos de energia e de emissão de gás carbónico (custo ambiental) serão, provavelmente, diferentes do que se previu. Os proprietários de edifícios podem então vir a decidir por reorientação do seu investimento, o que denota certa adaptabilidade estratégica. Portanto, a presença da opção real (ou opções) aumenta o valor do projeto, devendo ser adicionado ao VAL. Quanto maior for o número de opções e mais vasta for a incerteza inerente à sua utilização, maior será o valor do projeto [98].

Myers [99] aponta, como principal falha da abordagem tradicional, a incapacidade de ela ter em conta as interdependências entre investimentos sequenciais, mas admite-se que as técnicas das opções reais são demasiado complexas para aplicação corrente.

Nem sempre é possível estabelecer técnicas numéricas, sejam as que abordam diretamente o processo estocástico (simulação de Monte Carlo, por exemplo), sejam as que se baseiam nas equações diferenciais resultantes [100]. Independente disso, um processo estocástico envolve tempo e aleatoriedade, na medida em que qualquer variável está sujeita à incerteza económica,

o que denota o valor da capacidade que os decisores têm de agir conforme a variação destas próprias variáveis. É importante destacar que a incerteza económica futura se sobrepõe à incerteza de desempenho técnico, pois esta não pode ser tão facilmente definida em probabilidades [101].

Quando o problema da melhoria da eficiência energética é enfrentado na dimensão do mundo real, possui dificuldades inerentes que complicam a abordagem e a simulação da solução. Este problema é caracterizado pela existência de múltiplos objetivos competitivos cada um dos quais deve ser otimizado com soluções viáveis e disponíveis, as quais são prescritas por um conjunto de parâmetros e restrições que devem ser tidos em conta. Trata-se de um problema de otimização multiobjectivo que é, geralmente, abordado através de simulação e/ou técnicas multicritério de tomada de decisão que se concentram em aspetos particulares do problema, em vez de um confronto global ([102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109]).

Nos investimentos em reabilitação energética, as opções reais são interdependentes e podem ser encaradas como múltiplas (várias opções interagindo) ou compostas (o exercício de uma opção resulta na aquisição de outra), conforme as exigências regulamentares que recaem sobre o edifício em estudo. Valores isolados não podem ser somados já que a interação de múltiplas opções pode ter um efeito decisivo na quantificação do valor do projeto como um todo. De forma semelhante, em opções compostas, por exemplo, a exigência regulamentar de se reduzir o coeficiente de transmissão térmica da envolvente, pode levar o proprietário do edifício a antecipar a substituição do sistema de aquecimento do ambiente.

Isto ocorre porque a rentabilidade do investimento na melhoria do comportamento energético de edifícios apresenta diferenças significativas, sejam as medidas implementadas individualmente ou em conjunto. Por exemplo, uma determinada espessura de isolamento pode ser considerada a de rentabilidade ótima quando implementada individualmente e não o ser, quando implementada no âmbito de um pacote de medidas. Frequentemente, quando inseridas em pacotes de medidas mais abrangentes, menores espessuras de isolamento representam a rentabilidade ótima [110]. Isto se explica porque cada elemento da envolvente interage com os demais e a rentabilidade do investimento em sua melhoria é afetada, diretamente, pela eficiência e custo de operação do sistema de aquecimento/arrefecimento [13].

As decisões efetivas em investimentos de grande porte em reabilitação energética de edifícios tendem a se aproximar muito mais das sugeridas pela teoria das opções do que as apontadas pelo método tradicional dos *cash flows* atualizados. A forma como a incerteza política e económica afeta este investimento é uma evidência empírica dos benefícios desta abordagem.

Enquanto benefícios fiscais têm efeito determinístico nos *cash flows*, têm muito menos influência na decisão de investimento sob a ótica das opções reais. Saliente-se, no entanto, que a metodologia recomendada pela CE [10] teve a preocupação de expurgar os efeitos dos incentivos da análise de rentabilidade de medidas de eficiência, algo difícil de viabilizar, em certas circunstâncias.

Por exemplo, um défice tarifário nacional em algumas contas de energia, sob certos aspetos, poderia ser considerado um incentivo indireto ao uso destas mesmas fontes de energia. Isso também acontece quando analisamos os benefícios oferecidos ao regime bonificado para microprodução de energia através de painéis fotovoltaicos instalados em edifícios [45]. Já com uma influência mais limitada, mas não desprezível, os fatores de conversão de energia final em primária adotados em âmbito nacional [16] podem alterar os custos de emissões de CO₂, na perspetiva macroeconómica, na medida em que apresentam diferenças de 150% entre si.

Em síntese, o enquadramento das opções indica que, mantendo-se o resto constante, o valor da adaptabilidade de gestão (prémio de opção): é maior em contextos de incerteza; pode aumentar em períodos de altas taxas de juro e pode crescer em projetos de investimento mais longos ou que possam ser diferidos (ou adiados). Contrariamente ao convencionado, maior incerteza, taxas de juro mais elevadas ou mais tempo antes da implementação de um projeto (mesmo indicando atraso no recebimento ou poupança de *cash flows*) não torna necessariamente uma oportunidade de investimento menos valiosa [98].

Estes fatores podem potenciar a flexibilidade de decisão ou ter um efeito positivo no valor das componentes estratégicas (representado na Tabela 2.16 pelas setas para cima) e um efeito contrário nas componentes dos *cash flows* do VAL estático (setas para baixo).

Tabela 2.16. Efeitos do VAL e das opções reais no valor global do investimento (fonte: Trigeorgis [111]).

	<i>VAL estático</i>	+	<i>Prémio de opção</i>	=	<i>VAL expandido</i>
Incerteza	↓	+	↑	=	?
Taxa de juro sem risco	↓	+	↑	=	?
Tempo de diferimento	↓	+	↑	=	?

2.6 Considerações gerais

O desenvolvimento sustentável é possível, desde que se consiga integrar o crescimento económico com o equilíbrio ambiental e com a equidade social. Relatórios internacionais concordam que a promoção da eficiência energética e do uso de fontes de energia renováveis é essencial para a mitigação das alterações climáticas. Estas ações representam uma enorme oportunidade de economia de energia e consequente redução de emissões de CO₂ no setor de edifícios. No entanto, a nível mundial, o seu potencial ainda é pouco explorado.

A União Europeia tem comprovado, reiteradamente, um compromisso inequívoco com a sustentabilidade. Diretivas para a promoção da eficiência energética (EED), do uso de fontes de energia renováveis (RES) e para a melhoria do desempenho energético dos edifícios (EPBD) demonstram uma ação coordenada de políticas e estratégias que têm impacto direto no setor da

construção e no uso de edificações. Juntas, EED, RES e EPBD dão um exemplo de unidade e fornecem uma clara orientação para que os Estados-Membros reduzam o impacto do uso de energia em edifícios, proporcionando uma gama de benefícios sociais, ambientais e económicos.

A eficiência energética e o uso de FER contribuem substancialmente para diminuição da dependência energética e para mitigação das mudanças climáticas. São necessárias várias formas de apoio económico, bem como políticas para criar um ambiente favorável.

O Regulamento Delegado (UE) n.º 244/2012 [10] veio complementar a EPBD e especificar regras para comparação da rentabilidade de medidas de eficiência energética e do uso de fontes de energias renováveis em edifícios novos e existentes. Subentende-se, portanto, uma preocupação da UE em garantir que o investimento em medidas de eficiência energética seja rentável e que, ao mesmo tempo, os requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios não se afastem demasiadamente dos denominados níveis ótimos de rentabilidade.

Um dos pontos fulcrais nas políticas para melhoria do desempenho energético em edifícios é a baixa taxa de renovação do parque imobiliário. A participação dos edifícios novos é bastante reduzida, já que representa entre 1 e 2% do parque edificado [36]. Logo, a UE só vai atingir seus objetivos se concentrar esforços nos edifícios existentes. Ainda que as grandes renovações de edifícios consistam em intervenções complexas, diferentes estratégias devem ser utilizadas para promover o cumprimento de critérios fundamentais de sustentabilidade.

No entanto, o setor da reabilitação de edifícios continua a sofrer com a falta de investimento significativo. As políticas para promoção da reabilitação energética tem falhado no incentivo ao investimento e no estímulo do setor privado e dos proprietários de edifícios em geral. Para além da escassez de recursos em todos os setores da economia, o capital que estaria disponível para investimento em reabilitação energética sofre a concorrência de outras opções com retorno mais tangível. Na falta de informações concretas, o investimento em reabilitação energética só ocorre por imposição da regulamentação.

A reabilitação energética de edifícios deve ser encarada como um investimento conjunto, tanto dos proprietários dos imóveis, quanto das autoridades e formuladores de políticas, interessados na revitalização do ambiente urbano, na redução do consumo de energia e na adoção de soluções sustentáveis. Isto requer um movimento amplo e abrangente, onde a sensibilização em torno dos benefícios da reabilitação energética se alia à perspectiva de retorno tangível de investimento, uma vez que é no setor privado que se concentra o capital necessário para fomentar uma mudança com a magnitude esperada. A valorização económica das medidas de eficiência energética e do uso de energias renováveis em edifícios depende de informações de boa qualidade, que geralmente têm de ser coletadas caso a caso.

Ocorre que, na ausência destas informações, tem-se recorrido à opinião de especialistas para a transposição de diretivas, revisão ou criação de regulamentação, por vezes com certo grau de subjetividade. Desta forma, corre-se o risco de embarcar num ciclo vicioso, de investir pouco

para recolher os dados, de gerar estimativas imprecisas, de usar esta incerteza como motivo para não adotar as recomendações e, ao rejeitar as análises, também omitir investimentos públicos em reabilitação energética. Corre-se o risco, ainda, de se exigir do setor privado e dos proprietários de edifícios investimentos em soluções selecionadas com base em critérios subjetivos e imprecisos, sem que estas mesmas soluções sejam adotadas sequer nos edifícios públicos.

A subjetividade na quantificação dos benefícios da reabilitação energética, por parte das autoridades e formuladores de políticas, contrasta com mecanismos empresariais sofisticados de controlo de gastos e de ativos. O resultado é uma assimetria perigosa, na qual os gastos com energia são bem conhecidos, e os benefícios da reabilitação não podem ser representados de forma convincente, comparando-se com a cultura empresarial.

No melhor cenário, pode prevalecer a visão estratégica pelo menos dos proprietários de grandes edifícios que reconhecem o contributo da eficiência energética e das energias renováveis para o desenvolvimento sustentável e que insistem na sua inclusão permanente na pauta de investimentos. Mais frequentemente, no entanto, produz-se uma postura institucional reativa e relutante, que pode ser até contrária à intenção dos dirigentes preocupados com a questão ambiental, porém limitados pela falta de informação proveniente dos diversos níveis de governação e pela inadequação dos instrumentos de tomada de decisão.

Assim, métodos para a avaliação da rentabilidade da reabilitação energética de edifícios são extremamente oportunos e necessários para viabilizar o alcance dos objetivos estabelecidos.

***CAPÍTULO 3 - MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA
RENTABILIDADE DA REABILITAÇÃO
ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS***

3 MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA RENTABILIDADE DA REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

3.1 Introdução

Reabilitação energética é um conceito amplo que engloba alterações aplicáveis a um edifício, podendo compreender medidas de eficiência e o uso de energias renováveis. Ambas as ações devem resultar numa redução das necessidades de energia primária do edifício. A seleção das intervenções a implementar deve basear-se na quantificação de parâmetros associados à rentabilidade económica das possíveis soluções.

Estas ações são definidas em relação a todos os parâmetros utilizados para o cálculo que têm um impacto direto ou indireto no desempenho energético do edifício, inclusive quando são utilizados sistemas alternativos de alta eficiência enumerados no Artigo 6º da Diretiva relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD), tais como sistemas descentralizados de fornecimento energético baseados em energias provenientes de fontes renováveis, cogeração, redes urbanas ou coletivas de aquecimento e/ou arrefecimento.

Devem ser definidas técnicas de intervenção, consideradas mais adequadas, para responder às exigências de conforto atuais. Adequar as características dos edifícios a estas exigências de conforto irá envolver diversas decisões sobre intervenções que interagem entre si e que devem ser ponderadas no contexto da sustentabilidade que se pretende atingir. É recomendado, portanto, que as soluções sejam combinadas em pacotes de medidas de melhoria, uma vez que esta associação pode criar efeitos simultâneos conducentes a uma maior rentabilidade, em comparação com medidas isoladas.

Em edifícios existentes, a implementação de pacotes de melhoria deve representar economias de energia que possam ser claramente constatadas e quantificadas. Em seguida, é apresentada uma lista de possíveis medidas de promoção da eficiência energética a considerar no setor residencial, algumas das quais estão enunciadas no anexo III da Diretiva 2006/32/CE [53]:

- Aplicação de isolamento térmico na cobertura, paredes exteriores e pavimento. Entre os elementos construtivos de uma edificação, a cobertura é um dos que tem mais influência nos consumos energéticos da habitação ([112], [113]). A aplicação adequada de isolamento térmico pode reduzir o consumo de energia em aquecimento e arrefecimento, além de ajudar a mitigar condições que potencializam o aparecimento de humidade no interior, resultante de condensações;
- Substituição de janelas, adotando-se soluções que comportem caixilhos com corte térmico e vidros duplos ou triplos;
- Modernização dos sistemas de arrefecimento e/ou aquecimento da área habitável, e preparação de águas quentes sanitárias (AQS), substituindo-os por equipamentos de alta

eficiência e/ou que utilizem combustível com baixo fator de conversão de energia primária. Os sistemas centralizados a gás natural, por exemplo, são sistemas económicos e eficientes energeticamente;

- Instalação de painéis solares térmicos para preparação de AQS. Este sistema pode assegurar o suprimento de elevadas percentagens das necessidades anuais de aquecimento de águas para a cozinha e banhos, podendo ser utilizado também para aquecimento central;
- Instalação de painéis fotovoltaicos na cobertura ou na fachada sul do edifício. Este sistema pode gerar a eletricidade necessária para utilização dos sistemas do edifício, embora represente ainda um custo elevado, quando comparado a outras alternativas.

Um pacote de medidas pode incluir soluções que, embora não sejam rentáveis individualmente, podem contribuir substancialmente para a redução do consumo de energia primária e para a redução de emissões de CO₂, desde que o pacote como um todo proporcione rentabilidade satisfatória [11].

Como apresentado no capítulo 2, a metodologia de análise de rentabilidade de medidas de eficiência energética em edifícios, recomendada pela Comissão Europeia (CE) [10], utiliza dois vetores para alcançar a rentabilidade ótima de soluções: necessidades de energia primária (eixo horizontal [x]) para avaliar o impacto ambiental das medidas e custo global (eixo vertical [y]) para evidenciar o benefício económico de sua implementação, sendo que o gráfico resultante dos cálculos se assemelha a uma curva típica tal como ilustra a Figura 3.1.

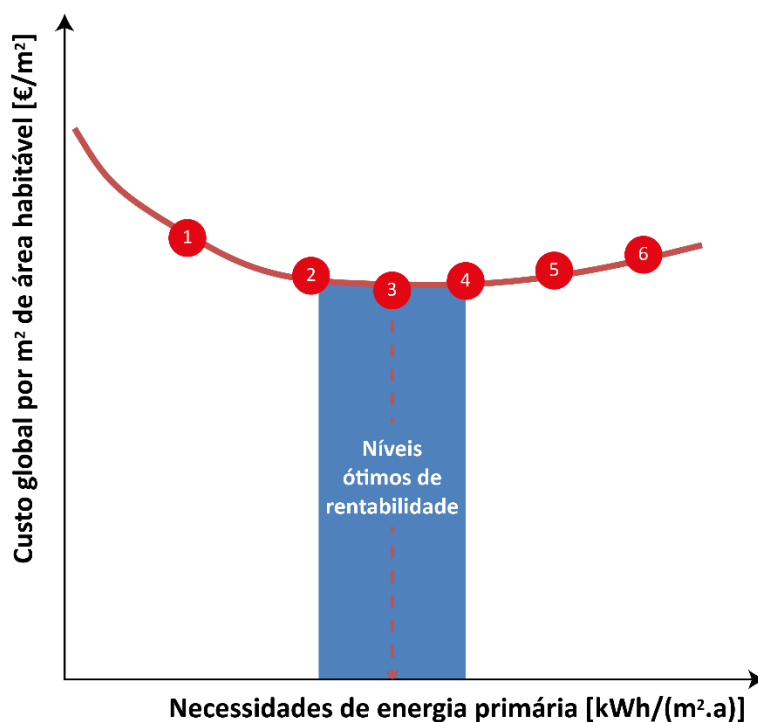


Figura 3.1. Ilustração da curva de rentabilidade ótima contemplando diferentes pacotes de medidas de eficiência.

A interação das inúmeras variáveis utilizadas nos cálculos dificulta a compreensão de quais são as espessuras de isolamento, as soluções de envidraçados, os sistemas de arrefecimento e/ou aquecimento da área habitável, de preparação de AQS e os baseados em fontes de energia renováveis (FER) com melhor custo-benefício e que, ao mesmo tempo, atendam limites impostos pela regulamentação.

Estes fatores dificultam também a atuação de vários intervenientes: **autoridades** (na formulação de políticas), **peritos** (na recomendação de ações corretivas), **fornecedores** de produtos e serviços (no seu posicionamento no mercado) e **proprietários de edifícios** (na decisão de investimento).

Apesar destas dificuldades, a metodologia recomendada pela CE e a regulamentação em vigor em Portugal apresentam oportunidades de melhoria. O quadro metodológico proposto no Regulamento Delegado n.º 244 é dirigido a autoridades nacionais (não a investidores). A metodologia proposta não considera questões de irreversibilidade (quando, em caso de arrependimento, não é possível recuperar todo ou a maior parte do capital investido) e possibilidade de diferimento (adiamento) ligadas às opções reais, intrínsecas a este tipo de investimento.

Com o objetivo de apresentar uma abordagem alternativa, que se dirija também a investidores e, ao mesmo tempo, auxilie o trabalho dos vários intervenientes, é descrito a seguir um método de seleção de soluções e avaliação da rentabilidade de medidas de eficiência energética, incluindo o uso de FER. São também definidos os parâmetros a serem utilizados em programas de cálculo de rentabilidade.

O método é composto por quatro fases de estudo, conforme pode ser observado na Figura 3.2.

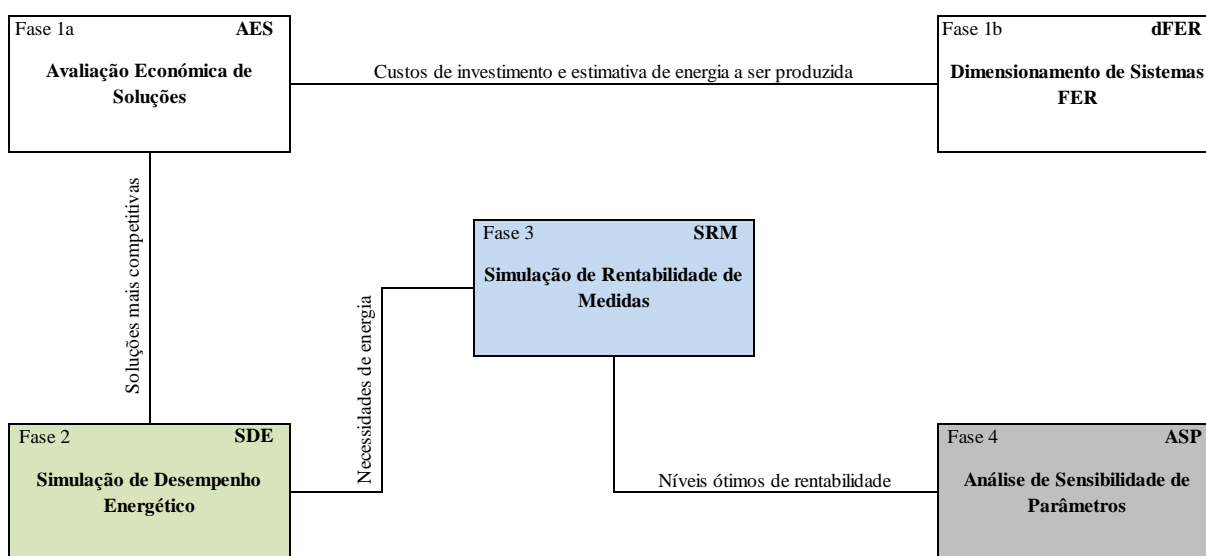


Figura 3.2. Método e suas fases de estudo.

- Fase 1a – Análise Económica de Soluções (AES)
- Fase 1b – Dimensionamento de Sistemas FER (dFER)
- Fase 2 – Simulação de Desempenho Energético (SDE)
- Fase 3 – Simulação de Rentabilidade de Medidas (SRM)
- Fase 4 – Análise de Sensibilidade de Parâmetros (ASP)

3.2 Análise Económica de Soluções (AES)

Na primeira fase é realizada avaliação económica de soluções utilizadas com mais frequência em âmbito nacional, no que concerne a isolamento, envidraçados, sistemas de arrefecimento e/ou aquecimento da área habitável, preparação de AQS e de sistemas baseados no uso de FER. Estes últimos dependem de um dimensionamento que é realizado em simultâneo (dFER), consoante características do edifício de referência e de sua localização (ver item 3.3).

A AES é baseada na adequabilidade de aplicação das soluções ao tipo de uso do edifício. É realizada numa análise individual dos custos de cada tipo de solução, ou seja, é efetuada a comparação entre soluções para cada função a desempenhar na envolvente (cobertura, paredes exteriores, pavimento e envidraçados), para cada tipo de sistema de arrefecimento, aquecimento, preparação de AQS e uso de FER.

Cumprе salientar que os custos destas soluções compreendem todos os custos diretos para sua efetiva implementação (instalação ou aplicação, mão de obra, assessórios etc.), manutenção e eliminação, conforme respetivo ciclo de vida. Considera-se também que estas ações ocorrem simultaneamente a outras, no contexto de uma iniciativa periódica de conservação ou de uma grande obra de renovação do edifício. Portanto, uma vez que o estudo incide na comparação de medidas, os custos que não são atribuídos diretamente à reabilitação energética são omitidos do cálculo, tais como as seguintes rubricas de custos:

- Os custos relativos a componentes que não influenciam o desempenho energético do edifício, por exemplo: o custo de limpeza da fachada, reparação das eventuais fissuras e da pintura das paredes, o custo da substituição de elementos como parapeitos, o custo do revestimento do pavimento, etc., pois os cálculos do desempenho energético realizados no âmbito deste trabalho não revelam diferenças nesta matéria;
- Os custos que são idênticos para todas as medidas avaliadas para um determinado edifício de referência (mesmo que as respetivas componentes tenham ou possam ter influência no desempenho energético do edifício). Uma vez que estas rubricas de custos não fazem diferença na comparação das medidas, não é obrigatório tê-las em conta. São exemplo disto terraplenagens e alicerces, custo das escadas, custo dos elevadores, o custo do aluguel, da montagem e da desmontagem dos andaimes, o custo da reparação da cobertura e substituição das telhas, revisão ou substituição do sistema de drenagem de águas pluviais, o custo de demolição, etc. mais uma vez com a condição prévia de não se preverem diferenças nestes custos para as medidas avaliadas dentro de uma mesma categoria.

Importa notar que o Regulamento Delegado (UE) n.º 244 não permite que se utilize a denominada abordagem de cálculo dos «*custos adicionais*». Essa abordagem não é adequada para calcular os níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético. Isto aplica-se, sobretudo, às medidas relativas a abordagens de «*arrefecimento passivo*», como a escolha da proporção de área envidraçada e a disposição das áreas envidraçadas em função da orientação do edifício, a ativação da massa térmica, o pacote de medidas relativo ao arrefecimento noturno, etc. A abordagem de cálculo dos custos adicionais torna difícil demonstrar as interligações entre determinadas características do edifício. Por exemplo, a escolha de um certo tipo de fachada exige determinadas condições estáticas prévias; os sistemas termoativos de aquecimento e arrefecimento dos edifícios exigem um certo nível de procura líquida de energia, etc. A tentativa de tomar todas estas potenciais interligações em consideração numa abordagem de cálculo dos custos adicionais tornaria o cálculo confuso e não-transparente [11].

A AES segue o que preconiza a EN 15459:2007 [57] para a análise económica de sistemas, estendendo e adaptando esta metodologia à análise económica de isolamento e envidraçados. Esta fase propicia a comparação da rentabilidade de soluções em unidades de custo comuns entre elas, como euros por quilowatt-hora [€/kWh] para equipamentos (sistemas), ou euros por resistência térmica [€/r], no caso dos isolamentos e envidraçados (envolvente do edifício).

A vida útil dos componentes e sistemas é diferenciada. No entanto, opta-se por adotar o mesmo período de vida útil para os diferentes sistemas. Na Tabela 3.1, são apresentados pressupostos de vida útil para os elementos mais importantes, assumidos nos cálculos de rentabilidade do presente trabalho.

Tabela 3.1. Ciclos de vida assumidos para os componentes e sistemas do edifício.

<i>Elemento</i>	<i>Vida útil [anos]</i>
Isolamento térmico	50
Envidraçados	40
Sistemas de arrefecimento e/ou aquecimento	20
Sistemas de preparação de AQS	20
Sistemas baseados em FER	20

Nota: No presente trabalho, assumiu-se um ciclo de vida económico de 30 anos para os edifícios estudados.

A AES permite estabelecer os limites inferiores e superiores de variação de preços de mercado para cada solução. Também permite reduzir significativamente a quantidade de combinações de medidas que serão analisadas nas fases posteriores, uma vez que se torna desnecessário analisar preços intermédios de cada solução. Os limites inferiores de preços disponíveis no mercado são utilizados para os cálculos de rentabilidade (SRM) e os limites superiores podem ser utilizados para a análise de sensibilidade de parâmetros (ASP), possibilitando uma perceção abrangente do comportamento das curvas e dos níveis ótimos de rentabilidade.

Assim, são considerados preços correntes de mercado [114], bem como preços fornecidos por associações de fabricantes ([115], [116]), de modo a obter a melhor estimativa para os custos iniciais de investimento e custos de manutenção associados à implementação das medidas de eficiência energética. Além disso, são solicitadas, por amostragem, cotações junto ao mercado de especialidade, para constatar a fiabilidade dos custos obtidos. O desempenho económico de cada solução é calculado em Valor Atualizado Líquido (VAL), conforme o ciclo de vida considerado para cada uso do edifício.

A seguir, são apresentadas as soluções estudadas neste trabalho. É importante destacar que as soluções selecionadas não devem ser consideradas como únicas opções rentáveis, mesmo que demonstrem desempenho económico satisfatório, ao longo do ciclo de investimento avaliado.

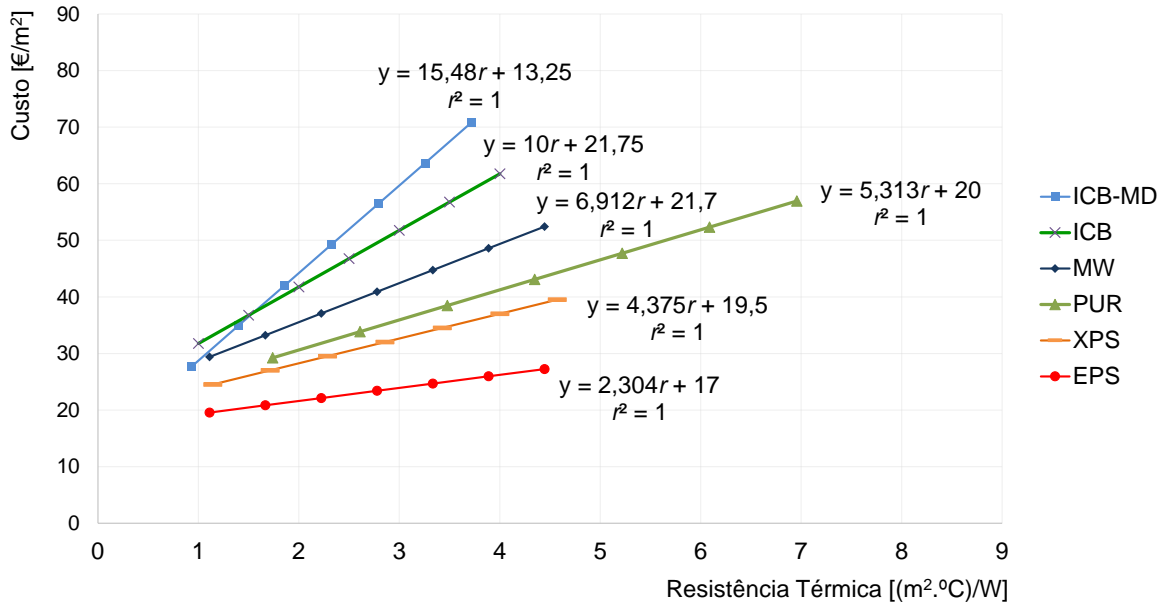
3.2.1 Soluções para isolamento térmico

A aplicação de isolamento térmico na envolvente opaca é uma medida que influencia fortemente as necessidades de energia útil para aquecimento e arrefecimento da área habitável do edifício. A eficiência desta medida depende do coeficiente de condutividade térmica do material - quanto menor o coeficiente, menor a transferência de calor através da envolvente. Devido à grande variação de preços de isolamento térmico e à diversidade de materiais disponíveis observada em estudos preliminares, opta-se por efetuar o levantamento detalhado desta variabilidade.

Os fabricantes de materiais de isolamento térmico tendem a compor o preço em função da quantidade, em [m³], de matéria-prima empregada na produção, de forma proporcional. Isto faz com que o custo do isolamento apresente uma evolução linear, consoante a resistência térmica ($r = e/\lambda$, onde e representa a espessura e λ a condutividade térmica).

A Figura 3.3 apresenta custos médios dos principais isolamentos térmicos em função da resistência térmica. No caso das paredes, considera-se o sistema de isolamento térmico pelo exterior (ETICS). As legendas de cada reta apresentam a composição do custo do isolamento, y , no seguinte formato: $y = \text{preço do material} \cdot r + \text{preço da aplicação}$, em [€/m²]. São apresentados os custos para aplicação de poliestireno extrudido (XPS), lã mineral (MW), fibra de vidro (GW), poliestireno expandido (EPS), aglomerado de cortiça expandida (ICB) e espuma de poliuretano rígido (PUR) [117]. Verifica-se que o EPS e o ICB-MD (cortiça expandida com massa volumétrica média) são as soluções de isolamento que constituem os limites de preços, inferior e superior, respetivamente. Logo, são estes os materiais escolhidos para as análises da variabilidade do custo do isolamento.

Esta análise assume uma condutividade térmica de $\lambda = 0,036$ para EPS e $0,045$ [W/(m.°C)] para ICB-MD. Assim, ao custo médio do material EPS, de € 2,304 por resistência unitária [€/r], é somado o valor de 17 [€/m²] que representa os custos de aplicação, composto por mão-de-obra e acessórios. No caso do ICB-MD, o custo do material é de € 15,48 por resistência unitária [€/r] e de 13,25 [€/m²] para aplicação. A diferença de preços cobrados por aplicação dos dois materiais refere-se a diferentes sistemas de aplicação utilizados por prestadores de serviço.



Nota: Valores sem impostos ou taxas.

Figura 3.3. Comparação de custo de materiais de isolamento em função de sua resistência térmica.

Embora estes valores sejam utilizados diretamente para isolamento de cobertura e paredes exteriores, devem ser considerados custos de aplicação mais elevados ao isolamento do pavimento, conforme características de construção, o que evidencia dificuldades acrescidas, inerentes a esta medida em edifícios existentes. Nos casos de estudo do capítulo 4, esta particularidade é analisada de acordo com o edifício estudado.

3.2.2 Soluções para envidraçados

Os componentes envidraçados da fachada são elementos que, normalmente, apresentam elevados coeficientes de transmissão térmica, comparativamente à envolvente opaca, sendo responsáveis por trocas de calor com o exterior. Adicionalmente, são elementos que representam a principal forma de entrada de radiação solar no edifício. Assim, deve-se equacionar esta medida de reabilitação energética, no sentido de melhorar o desempenho energético do edifício.

Para se obter um melhor desempenho térmico dos envidraçados, é recomendável avaliar o efeito de se alterar a resistência térmica das janelas. Cada tipo de material tem diferentes coeficientes de transferência de calor associados. Nos caixilhos das janelas, é possível aplicar soluções que favorecem a resistência térmica: materiais com menor condutibilidade térmica ou soluções com ruptura térmica.

Após a análise preliminar, optou-se por concentrar a AES em janelas em PVC (policloreto de vinil), uma vez que estas demonstraram maior rentabilidade, em estudos preliminares, conforme Tabela 3.2. Adicionalmente, apresenta-se as características de uma janela comum de madeira, para fins de comparação.

Tabela 3.2. Comparação de janelas e respetivos custos, em [€/r].

<i>Janelas</i>					
U [W/(m ² .°C)]	Fator Solar g_w	Caixilharia	Custo [€/m ²]	Resistência [m ² .°C/W]	[€/r]
5,100	0,85	Madeira	54,95	0,196	280,22
2,453	0,59	PVC	205,49	0,408	504,06
2,385	0,48	PVC	211,65	0,419	504,79
2,370	0,59	PVC	238,90	0,422	566,20
2,249	0,58	PVC	214,66	0,445	482,77
2,080	0,59	PVC	187,64	0,481	390,29
2,071	0,47	PVC	294,12	0,483	608,83
2,070	0,30	PVC	283,02	0,483	585,86
1,870	0,58	PVC	197,29	0,535	368,94
1,800	0,47	PVC	209,45	0,556	377,01
1,210	0,36	PVC	330,77	0,826	400,23

Nota: Valores sem impostos ou taxas, incluindo preços para aquisição, instalação e uso de assessorios.

Logo, de acordo com o critério estabelecido de euros por resistência unitária [€/r], as janelas que seriam selecionadas para as simulações são as com $U = 1,870, 1,800$ e $2,080$ [W/(m².°C)], além da já existente no edifício de referência, aqui representada pela janela com $U = 5,100$ [W/(m².°C)].

3.2.3 Soluções para sistemas convencionais de climatização

Os equipamentos para arrefecimento, aquecimento e preparação de AQS são os componentes que efetivamente consomem energia. As suas características são determinantes para um maior ou menor consumo energético associado a um determinado fim. Na AES dos sistemas convencionais (não FER) são considerados vários tipos de equipamentos elétricos, a combustíveis gasosos ou líquidos e a biomassa.

A AES indica os sistemas que constituem as opções mais rentáveis, para gamas de energia útil estudadas em cada caso. Embora a EN 15459:2007 [57] estabeleça diferentes percentuais de custos de manutenção, na consulta junto ao mercado de especialidade verifica-se que predomina o índice de 1% do investimento inicial em sistemas. Este valor foi adotado para todas as categorias de sistemas.

A seguir, são descritos os sistemas de funcionamento de cada um dos equipamentos considerados neste trabalho:

- **Bomba de Calor (BC)**

São equipamentos concebidos para transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente, movendo energia térmica na direção oposta ao fluxo espontâneo de calor. Também pode operar realizando um ciclo termodinâmico de refrigeração por compressão. São sistemas com alta eficiência em ambos os sentidos de transferência de energia térmica.

Apesar de aparelhos de ar condicionado e refrigeradores serem exemplos comuns deste princípio, o termo “bomba de calor” é geral e aplica-se a dispositivos usados para aquecimento e arrefecimento de áreas habitáveis. Quando a bomba de calor é usada para aquecimento, ela emprega o mesmo ciclo de refrigeração usado por estes equipamentos, mas no sentido contrário, libertando calor no espaço condicionado ao invés de fazê-lo no ambiente em redor. Neste caso, as bombas de calor geralmente extraem calor do ar exterior.

O funcionamento de uma bomba de calor baseia-se no princípio de Carnot em que se submete um gás, colocado no interior de um recinto fechado, reversivelmente, a uma série de quatro mudanças de estado de um determinado agente que atua numa máquina térmica [118]. É o mesmo princípio presente em aparelhos como o frigorífico e a maioria dos aparelhos de ar condicionado, uma vez que a energia térmica de uma fonte (frequentemente do próprio ambiente) é transportada para uma zona de utilização a temperaturas mais elevadas [119].

A bomba de calor avaliada na AES possui eficiência para aquecimento $\eta = 3,33$, para arrefecimento $\eta = 2,68$ e para preparação de AQS $\eta = 3,00$. São contabilizados a unidade exterior, as unidades de distribuição em cada compartimento climatizado e o depósito de AQS (ver Figura 3.4). Por exemplo, numa habitação de tipologia T2 (dois dormitórios), são orçamentados 1 unidade exterior, 1 depósito para AQS e 3 unidades de distribuição, para climatização dos quartos (2) e sala de estar (1).

a)



b)



Figura 3.4. Exemplos de componentes associados à Bomba de Calor (BC): a) unidade exterior; b) depósito de AQS.

- **Ar Condicionado (AC)**

Como referido, o sistema de ar condicionado apresenta funcionamento similar ao da BC, mas não atende as necessidades de produção de AQS. O ar condicionado avaliado na AES é um sistema *muli-split* “ar-ar” que possui eficiência para aquecimento $\eta = 4,30$ e para arrefecimento $\eta = 3,50$. São contabilizadas a unidade exterior (igual ao demonstrado na Figura 3.4) e unidades de distribuição em cada compartimento climatizado (Figura 3.5). A distribuição dos equipamentos nos compartimentos é similar à BC.



Figura 3.5. Exemplo de unidade de distribuição de Ar Condicionado (AC).

- **Caldeira a Gás - CG**

O funcionamento de uma caldeira a gás é simples e consiste em queimar o gás natural para gerar calor pela combustão, aquecendo a água que circula no interior do equipamento. Esta água quente é acumulada e, posteriormente, percorre toda a rede de tubagem até chegar aos elementos emissores/radiadores de calor que compõem o sistema.

A circulação de água quente nos emissores/radiadores permite a dissipação de calor e o aumento da temperatura ambiente. A caldeira a gás avaliada na AES é um sistema misto que possui eficiência para aquecimento $\eta = 0,93$ e para preparação de AQS $\eta = 0,83$. São contabilizadas a unidade central e emissores/radiadores em cada compartimento climatizado (ver Figura 3.6).

a)



b)



Figura 3.6. Exemplos de componentes associados à Caldeira a Gás (CG): a) unidade central e depósito de AQS; b) emissores/radiadores.

- **Emissor Térmico Elétrico (EE)**

Este equipamento não necessita de obras para sua instalação e, portanto, torna-se bastante popular para aquecimento de habitações. O emissor elétrico avaliado na AES possui eficiência para aquecimento $\eta = 1,00$. São contabilizados emissores para cada compartimento climatizado (Figura 3.7).



Figura 3.7. Exemplo de Emissor Elétrico (EE).

- **Caldeira Elétrica (CE)**

A caldeira elétrica em estudo é dedicada, exclusivamente, à produção de AQS. É um equipamento composto por um vaso de pressão onde a água é aquecida por resistências ou eletrodos. A caldeira elétrica avaliada na AES (Figura 3.8) possui eficiência para preparação de AQS $\eta = 0,72$.



Figura 3.8. Exemplo de Caldeira Elétrica (CE).

- **Esquentador de Água a Gás (EG)**

Este equipamento para preparação de AQS é também muito comum e bastante simples. Possui um queimador, envolvido por uma serpentina onde circula a água a ser aquecida. É acionado a partir da abertura de registos na rede de água, sendo a chama controlada automaticamente por um manómetro. Este dispositivo possui um sensor e uma válvula que controla a passagem do gás para o queimador. O esquentador a gás avaliado na AES (Figura 3.9) possui eficiência para preparação de AQS $\eta = 0,78$. Além deste, é analisado um outro mais antigo e comumente encontrado em edifícios de referência antigos, com eficiência $\eta = 0,60$.



Figura 3.9. Exemplo de Esquentador a Gás (EG).

Certamente, outros sistemas convencionais poderiam ser considerados na busca da melhor solução para arrefecimento e/ou aquecimento da área habitável e preparação de AQS. No entanto, o objetivo deste trabalho é avaliar a rentabilidade da reabilitação energética de edifícios e não conduzir uma investigação exaustiva de equipamentos. Assim, esta amostra de sistemas mais comumente encontrados no mercado nacional é considerada suficiente. O dimensionamento dos sistemas também pode ser alvo de diferentes interpretações e pontos de vista, mas os equipamentos foram selecionados em função dos casos de estudo que são apresentados no capítulo 4.

Na Tabela 3.3, são resumidas as principais características dos equipamentos em estudo, bem como os custos que se identificou serem representativos de cada tecnologia. A relação euros por quilowatt-hora [€/kWh] depende de estimativas de necessidades de energia para rateio de custos de investimento para cada aplicação dos equipamentos, parâmetros estes melhor explorados no âmbito particular de cada caso de estudo. Devido à pequena variação nos custos de sistemas de arrefecimento, aquecimento e preparação de AQS (dentro de uma mesma tecnologia), opta-se por não analisar a influência da variação do seu custo.

Tabela 3.3. Resumo de sistemas convencionais.

<i>Sistemas convencionais</i>					
Equipamento	Fonte de Energia	Arrefecimento [η]	Aquecimento [η]	AQS [η]	Preço [€]
Bomba de Calor	Eletricidade	2,68	3,33	3,00	8908,00
Ar Condicionado	Eletricidade	3,50	4,30	----	4023,00
Caldeira a Gás	Gás	----	0,93	0,83	2026,00
Emissor Elétrico	Eletricidade	----	1,00	----	738,00
Caldeira Elétrica	Eletricidade	----	----	0,72	439,00
Esquentador a Gás	Gás	----	----	0,78	440,00
Esquentador a Gás Antigo	Gás	----	----	0,60	264,00

Nota: Valores sem impostos ou taxas, incluindo custos de aquisição, instalação e acessórios para aplicação num T2 com 80m².

3.3 Dimensionamento de Sistemas FER (dFER)

Os edifícios podem servir como coletores e transformadores de energias renováveis, atendendo a uma grande parcela das suas necessidades energéticas de forma sustentável, com mínima dependência de conexão com redes de energia. Ao combinar sua produção com sistemas convencionais ou dispositivos de armazenamento, podem atender satisfatoriamente às necessidades de energia para arrefecimento e/ou aquecimento da área habitável e preparação de AQS, com reduzidos níveis de perda ou desperdício.

Em estudos que contemplam o uso de fontes de energia renováveis (FER), deve ser realizada uma AES para estes sistemas, a partir de um dimensionamento dos equipamentos, conforme as particularidades do edifício de referência e a sua localização geográfica, o que implica diferentes necessidades de energia útil e também diferentes potenciais para produção de energia renovável.

A configuração ótima destes sistemas depende do correto dimensionamento dos seus componentes (dFER) para que possa ser aproveitado o máximo potencial do equipamento e da localização do edifício, sem que haja desperdício da energia produzida. Devido à intermitência na produção deste tipo de energia, a composição com sistemas convencionais deve ser bem planeada. O recurso a programas especialmente dedicados às estimativas de produção de energia é imprescindível.

As fontes de energia renováveis consideradas no presente trabalho são a solar e a biomassa, consideradas de maior penetração no mercado português. É analisada a influência da aplicação de sistemas solares térmicos para preparação de AQS, painéis fotovoltaicos para geração de eletricidade e caldeiras a biomassa para aquecimento e preparação de AQS. Em seguida, são descritos os equipamentos, seu funcionamento, bem como algumas estimativas de contributo de energia.

- **Solar Térmico de Termossifão (ST T) e de Circulação Forçada (ST C)**

De acordo com a regulamentação portuguesa em vigor, a instalação de sistemas solares para preparação de AQS é obrigatória para novas construções e nas grandes reabilitações, desde que se verifiquem as regras de exposição solar adequada. É possível instalar estes sistemas em todos os edifícios, desde que não haja sombreamento na área mais propícia à captação de radiação solar, nem restrições de carácter estético ou arquitetónico.

O funcionamento de um sistema solar térmico baseia-se na transformação da radiação solar incidente em sua superfície em energia térmica. Conforme ilustrado a seguir, existem dois tipos de sistemas solares térmicos: de termossifão (Figura 3.10) e de circulação forçada (Figura 3.11). O primeiro tem o depósito montado na parte superior do painel e o seu funcionamento é mais simples, uma vez que funciona por ação das correntes de convecção natural do fluido.

Os sistemas de circulação forçada são mais complexos, visto serem compostos por um conjunto de componentes, entre eles o depósito, montado separadamente do coletor [120]. O calor é absorvido pelo líquido que se encontra dentro do painel e é transportado, com a ajuda de uma bomba, através de tubos devidamente isolados até ao depósito de água quente. Essa água quente fica disponível num depósito acumulador onde o material isolante impede o arrefecimento da água. Apesar de mais caros, apresentam a vantagem de uma melhor estratificação em seu depósito, por permanecer na posição vertical. Além disso, sua aceitação é maior em edifícios onde há restrições de caráter estético ou arquitetónico.



Figura 3.10. Exemplo de Solar Térmico de Termostato (ST T).



Figura 3.11. Exemplo de Solar Térmico de Circulação Forçada (ST C).

No dFER, o contributo dos sistemas solares térmicos é estimado com recurso ao programa SolTerm 5.1.4 [121]. A Tabela 3.4 apresenta as produções anuais médias estimadas para um sistema com área do coletor de 1,92 [m²] e depósito com capacidade para 200 litros, para localidades dos casos de estudo apresentados no capítulo 4.

Tabela 3.4. Contributo anual de sistemas solares térmicos, em [kWh].

<i>Localização</i>	<i>Contributo anual [kWh]</i>
Almeida	1233
Amarante	1259
Coimbra	1286
Albufeira	1408

- **Painel Fotovoltaico (PV)**

Os painéis fotovoltaicos (Figura 3.12) convertem a radiação solar em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas compostas por duas camadas de material semicondutor: na camada *N*, existe um excesso de eletrões periféricos e na camada *P*, existe um défice de eletrões. Com a incidência de luz nas células, cada fotão com energia suficiente libertará um eletrão transformando-o em condutor e devido ao campo elétrico gerado na união *PN*, os eletrões são orientados da camada *P* para a camada *N*, obtendo-se assim energia elétrica [120]. Esta energia elétrica produzida pode ser armazenada em baterias para autoconsumo no próprio edifício, ou vendida à rede elétrica nacional.

Em Portugal, o valor monetário relativo à energia produzida e vendida por PV à rede é atualmente estabelecido com base em Decreto-Lei 153/2014 [45]. O valor resulta de 90% da média aritmética simples dos preços de fecho do Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE) para Portugal (mercado diário), relativos ao mês de produção, em €/kWh. Atualmente, este valor é inferior a 20% do custo médio do [kWh] de eletricidade, com impostos e taxas, que neste trabalho é de € 0,2390.



Figura 3.12. Exemplo de Painel Fotovoltaico (PV).

Os impactos ambientais mais relevantes provocados por PVs ocorrem nas fases de produção, construção e desmantelamento dos sistemas. No entanto, os painéis fotovoltaicos devolvem a energia utilizada na sua fabricação em cerca de três anos [120]. No dFER, o contributo dos painéis fotovoltaicos é estimado com recurso ao programa PVsyst [122]. A Tabela 3.5 lista as produções anuais médias estimadas para um sistema com área de painel de 15 [m²] 12 módulos fotovoltaicos e 1 inversor, para as localidades dos casos de estudo apresentados no capítulo 4.

Tabela 3.5. Contributo anual de painéis fotovoltaicos, em [kWh].

<i>Localização</i>	<i>Contributo anual [kWh]</i>
Almeida	5491
Amarante	5419
Coimbra	5305
Albufeira	5742

Estas estimativas consideram equipamentos orientados a sul, para que consigam captar mais radiação solar e, conseqüentemente, produzir mais energia. Contudo, existem opiniões divergentes em relação ao retorno económico desta opção e alguns recomendam que os painéis devam ser instalados virados para oeste. Isto deve-se ao facto de que existe uma maior procura de energia no período da tarde, sendo que os painéis virados para sul absorvem a maior parte da energia durante o meio do dia. Teoricamente, a opção de se virar os seus painéis solares para oeste faz com que sua produção coincida com maior procura de eletricidade. Outra questão a se considerar no dFER é que as maiores necessidades de energia em Portugal ocorrem nas regiões mais ao norte e se dão durante o inverno, justamente quando a produção de energia por parte dos PVs é menor, em teoria. Assim, na opção de autoconsumo, deve-se garantir a capacidade de armazenamento nos picos de produção para evitar desperdício de energia. De qualquer forma, para se assegurar o melhor equilíbrio económico para PVs devem-se realizar estudos adequados.

- **Caldeira a Biomassa (CB)**

A caldeira a biomassa dimensionada neste trabalho desempenha dupla função (aquecimento da área habitável e preparação de AQS) e é alimentada por *pellets*. Quando dimensionada para estas funções, sua instalação adquire alguma complexidade, requerendo infraestrutura e espaço adequado ao seu funcionamento, inclusive para armazenamento e reposição dos *pellets* (ver Figura 3.13). O cálculo do contributo da CB é realizado com base na regulamentação portuguesa [16]. Os *pellets* são um granulado, geralmente produzidos a partir de resíduos provenientes de serragem de madeira, que é refinada, seca e, posteriormente, comprimida. São extremamente densos e o seu poder calorífico (em torno de 5 [kWh/kg]) depende do tipo de madeira e do seu processo de transformação. Devido à eficiência das caldeiras a biomassa desenvolvidas recentemente, a emissão de compostos de gases é muito reduzida, o que as torna uma das formas de aquecimento menos poluentes, atualmente disponíveis no mercado. O princípio de funcionamento dos equipamentos a biomassa baseia-se em quatro fases: a alimentação do equipamento, a ignição, a combustão e a descarga de gases. A alimentação do equipamento em estudo é automática e o sistema conta com um mecanismo para transportar o combustível do depósito para o queimador. A ignição é automática, pois o sistema tem um dispositivo incorporado no queimador, que se torna incandescente e, juntamente com ar do ventilador, faz atear e incendiar a biomassa com rapidez.



Figura 3.13. Exemplo de Caldeira a Biomassa (CB).

Na combustão, o calor produzido pela queima da biomassa é transferido para os permutadores de calor, consoante a utilização de ar ou água quente no edifício. Os gases que resultam da combustão são libertados para o exterior através de um ventilador de exaustão [123]. Muitas outras opções de sistemas a biomassa são comercializadas no mercado, principalmente para suprir necessidades de aquecimento da área habitável. No entanto, a opção por um sistema central deve-se ao facto de não ser cómodo, nem viável, instalar um sistema em cada compartimento da habitação.

Na Tabela 3.6, são resumidas as principais características dos equipamentos baseados em FER em estudo, bem como os seus custos. A relação euros por quilowatt-hora [€/kWh] depende de estimativas de necessidades de energia para rateio de custos de investimento para cada aplicação dos equipamentos, parâmetros estes melhor explorados no âmbito particular de cada caso de estudo do capítulo 4.

Tabela 3.6. Resumo de sistemas baseados em FER.

Equipamento	<i>Sistemas FER</i>				
	Fonte de Energia	Energia Produzida	Aquecimento [η]	AQS [η]	Preço [€]
Solar Térmico de Termossifão	Solar	Térmica	----	1,00	1617,00
Solar Térmico de Circulação Forçada	Solar	Térmica	----	1,00	2698,00
Painel Fotovoltaico	Solar	Eletricidade	----	----	10451,00
Caldeira a Biomassa	<i>Pellets</i>	Térmica	0,92	0,92	6365,00

Nota: Valores sem impostos ou taxas, incluindo custos de aquisição, instalação e acessórios para aplicação num T2 com 80m².

3.4 Simulação de Desempenho Energético (SDE)

A SDE considera o levantamento dimensional, geometria e características térmicas da envolvente, bem como os sistemas técnicos (equipamentos de aquecimento, preparação de AQS e FER). Nesta fase, combinam-se as soluções mais promissoras, selecionadas na AES, variando-se as espessuras de isolamento em cada zona da envolvente e aplicando as diferentes opções de sistemas de climatização. A SDE fornece as estimativas de consumo de energia ajustadas aos padrões de utilização do edifício, considerando também eventuais contribuições de FER (o que atende também a regulamentação portuguesa [16]).

Inicialmente, o cálculo das necessidades nominais de energia para climatização é realizado de acordo com o método sazonal descrito na norma EN ISO 13790: 2008 [69]. Este cálculo parte das características geométricas e térmicas da envolvente de cada edifício em estudo. A Figura 3.14 ilustra como se dá a transferência de calor pela envolvente do edifício.

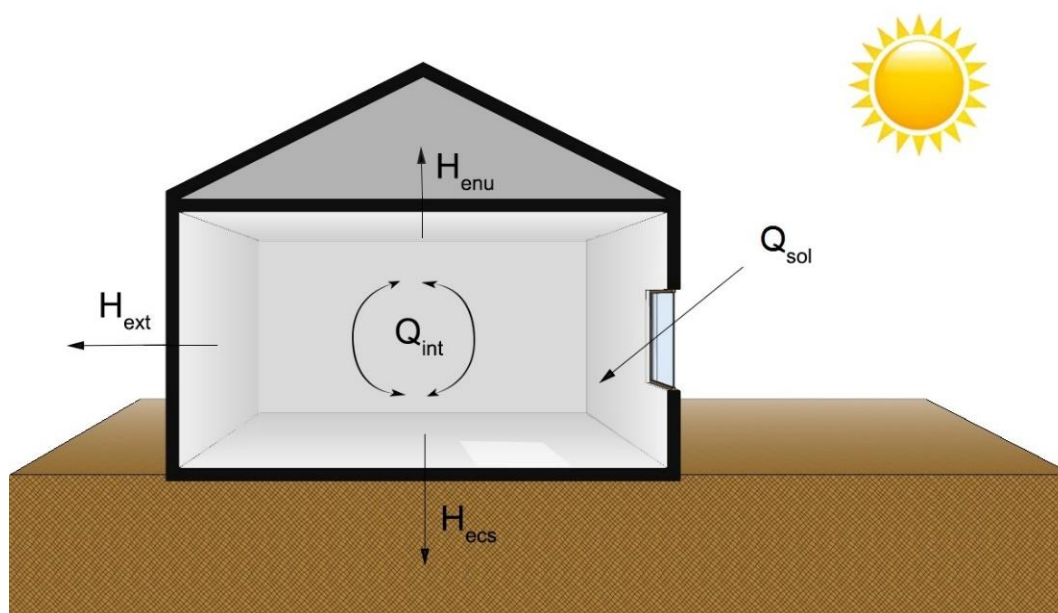


Figura 3.14. Representação esquemática dos coeficientes de transferência de calor e das componentes de ganhos de calor [124].

Em todos os casos de estudo apresentados neste trabalho, as necessidades de arrefecimento são negligenciadas. De acordo com a regulamentação portuguesa, é permitido considerar que as necessidades de arrefecimento, $E_{c,k}$, são nulas quando se assegura que o risco de sobreaquecimento é mínimo. Com base em cálculos preliminares, verificou-se reduzido risco de sobreaquecimento, tendo-se assumido negligenciar as necessidades de arrefecimento. As necessidades nominais de energia primária do edifício, PE , resultam, assim, da soma das necessidades nominais de energia útil para aquecimento, $E_{h,k}$, e de produção de AQS, $E_{w,k}$, e da subtração de qualquer contributo de FER por $[m^2]$ de área aquecida, $E_{r,k}$. A expressão a aplicar é adaptada daquela prevista na proposta do Despacho 15793-I/2013 [16]:

$$PE = \left[\sum_{k=1}^{K_h} \frac{f_{h,k} \cdot E_{h,k}}{\eta_{h,k}} P_{h,k} \right] + \left[\sum_{k=1}^{K_w} \frac{f_{w,k} \cdot E_{w,k}}{\eta_{w,k}} P_{w,k} \right] - \left[\sum_{k=1}^{K_r} E_{r,k} \cdot P_{r,k} \right] \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})] \quad (11)$$

onde um dado sistema k é vinculado a uma única fonte de energia; K_h , K_w e K_r são o número de sistemas para aquecimento da área habitável, preparação de AQS e produção de energia a partir de FER, respetivamente; $f_{h,k}$ e $f_{w,k}$ são as parcelas das necessidades de energia útil associadas a cada sistema k ; $P_{h,k}$, $P_{w,k}$ e $P_{r,k}$ são os fatores de conversão entre energia final e energia primária associados com a única fonte de energia de cada sistema k ; $\eta_{h,k}$ e $\eta_{w,k}$ são as eficiências de cada sistema. Em Portugal, os fatores de conversão entre energia final e energia primária a utilizar na determinação das necessidades nominais anuais de energia primária de edifício, são de 2,5 [kWh_{EP}/kWh] para eletricidade e de 1 [kWh_{EP}/kWh] para combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. As necessidades energéticas de aquecimento do edifício, $E_{h,k}$, são calculadas através da seguinte expressão:

$$E_{h,k} = [Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int,i} + Q_{sol,i})] / A_p \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})] \quad (12)$$

em que $Q_{tr,i}$ e $Q_{ve,i}$ representam os coeficientes de transferência de calor por transmissão e por ventilação, respetivamente, dados em [kWh/a]; $\eta_{H,gn}$ é o fator de utilização de ganhos na estação de aquecimento; $Q_{int,i}$ e $Q_{sol,i}$ são, respetivamente, os ganhos solares internos e através dos vãos envidraçados, também em [kWh/a]; A_p é a área útil de pavimento interior, em [m²]. De seguida, apresenta-se a expressão para cada uma das parcelas da Equação (12):

$$Q_{tr,i} = 0,024 \cdot GD \cdot H_{tr,i} \quad [\text{kWh/a}] \quad (13)$$

onde $H_{tr,i}$ é o coeficiente global de transferência de calor por transmissão, que inclui as parcelas representadas esquematicamente na Figura 3.14, relativas às perdas de calor para o exterior (H_{ext}), para espaços não úteis e edifícios adjacentes (H_{enu}) e para elementos em contato com o solo (H_{ecs}). Estes coeficientes dependem dos coeficientes de transmissão térmica (U) das soluções e das perdas lineares (ψ).

$$Q_{ve,i} = 0,024 \cdot GD \cdot H_{ve,i} \quad [\text{kWh/a}] \quad (14)$$

onde $H_{ve,i}$ é o coeficiente global de transferência de calor por ventilação, dado por:

$$H_{ve,i} = 0,34 \cdot R_{ph} \cdot A_p \cdot P_d \quad [\text{W}/^\circ\text{C}] \quad (15)$$

em que R_{ph} representa a taxa nominal de renovação do ar interior na estação de aquecimento, [h⁻¹]; P_d é o pé-direito médio dos compartimentos aquecidos, em [m].

$$Q_{int,i} = 0,72 \cdot q_{int} \cdot M \cdot A_p \quad [\text{kWh/a}] \quad (16)$$

em que q_{int} representa os ganhos térmicos internos médios por unidade de superfície, $4 \text{ [W/m}^2\text{]}$; M é a duração média da estação convencional de aquecimento, [mês].

Os ganhos solares, Q_{sol} , dependendo da orientação de cada janela, são obtidos através da Equação:

$$Q_{sol,i} = \sum_{j=1}^{no} (X_j \cdot F_{s,j} \cdot A_{s,j}) \cdot G_s \cdot M \quad [\text{kWh/a}] \quad (17)$$

em que j corresponde a cada uma das orientações (no); G_s representa o valor médio mensal de energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul durante a estação de aquecimento, por unidade de área, $[\text{kWh/m}^2 \cdot \text{mês}]$; X_j é o fator de orientação; $F_{s,j}$ é o fator de obstrução do vão envidraçado associado com orientação j ; $A_{s,j}$ é a área efetiva da superfície coletora de radiação solar do vão envidraçado com orientação j , $[\text{m}^2]$, dada pelo produto da área de vidro da janela pelo respetivo fator solar.

A utilização de um fator de ganhos na Equação (12), $\eta_{H,gn}$, permite introduzir o efeito dinâmico do edifício no método sazonal [69], obtido através das Equações (18) a (21):

$$\text{se } \gamma_H > 0 \text{ e } \gamma_H \neq 1: \quad \eta_{H,gn} = \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{a_H+1}} \quad (18)$$

$$\text{se } \gamma_H = 1: \quad \eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H + 1} \quad (19)$$

$$\text{se } \gamma_H < 0: \quad \eta_{H,gn} = \frac{1}{\gamma_H} \quad (20)$$

$$\text{em que:} \quad \gamma_H = \frac{Q_{int,i} + Q_{sol,i}}{Q_{tr,i} + Q_{ve,i}} \quad (21)$$

e a_H é estabelecido em função das classes de inércia térmica de edifícios, 1,8, 2,6 e 4,2, que correspondem a inércia térmica fraca, média e forte, respetivamente, em $[\text{W}/^\circ\text{C}]$. Neste trabalho assume-se inércia térmica média. Com relação às pontes térmicas lineares, são considerados valores por defeito.

Neste método, a energia útil necessária para a preparação de AQS é determinada de acordo com o ponto 3.4 do Despacho 15793-I/2013 [16] (ver Equação 4). A atual regulamentação portuguesa vem estabelecer que os requisitos energéticos mínimos para edifícios existentes (Portaria n.º 349-B/2013 [16]) sujeitos a grandes intervenções deve ser verificada conforme

coeficientes limite estabelecidos em função do ano de construção do edifício. Por exemplo, no caso dos edifícios construídos antes de 1960, o valor do PE não pode exceder o limite de 1,5 estabelecido para o edifício de referência, conforme Tabela 3.7.

Tabela 3.7. Relação entre os valores das necessidades nominais e limites, de energia útil para aquecimento, arrefecimento e energia primária de edifícios sujeitos a grandes intervenções.

<i>Ano de construção</i>	$E_h / Limite$	$E_c / Limite$	$PE / Limite$
Anterior a 1960	Não aplicável	Não aplicável	1,50
Entre 1960 e 1990	1,25	1,25	1,50
Posterior a 1990	1,15	1,15	1,50

As necessidades energéticas de um determinado edifício dependem das condições climáticas associadas à sua localização e orientação. Portugal está localizado no Sudoeste europeu, que se caracteriza pelo predomínio do clima mediterrâneo e se enquadra na classificação Csa/Csb de Köppen (C: clima temperado quente; s: verão seco; a: verão quente; b: verão ameno) [50].

Os dados climáticos necessários para a avaliação do comportamento térmico e desempenho energético encontram-se publicados no Despacho 15793-F/2013, que integra o Decreto-Lei 118/2013 [16]. Nesse despacho define-se que o país encontra-se dividido em três zonas climáticas de inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3), as quais servem para impor diferentes níveis de requisitos de qualidade térmica da envolvente (ver Figura 3.15).

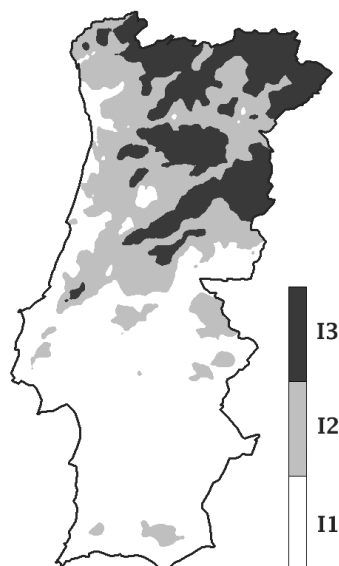


Figura 3.15. Zonas climáticas de inverno, em Portugal.

Os parâmetros climáticos disponíveis para a estação de aquecimento (inverno) são os seguintes:

GD - Número de graus-dias para aquecimento, considerando como temperatura base 18 °C;
 M - Duração da estação de aquecimento, em meses;
 G_S - Energia solar média mensal durante a estação, recebida numa superfície vertical orientada a sul, [kWh/m².mês].

A obtenção do valor dos graus-dias e duração da estação de aquecimento é em função da localização e da altitude do local em que o edifício se encontra construído. O intervalo de graus-dias de aquecimento em Portugal continental é de 987 °C a 2015 °C. A cada local corresponde um valor médio mensal de radiação solar que deverá ser multiplicado pelo número de meses da estação de aquecimento ($G_S \cdot M$), tal como se ilustra na Figura 3.16.

Este conjunto de pontos permitem verificar que a radiação solar está associada diretamente aos GD. A curva obtida por regressão linear deste conjunto de dados, apresentado na Figura 3.16, apresenta coeficiente de correlação de 0,79. Esta curva permite correlacionar o valor dos graus-dias de aquecimento com os de radiação solar, ou seja, ao incremento de graus-dias associado à alteração da localização corresponde um determinado aumento da radiação solar disponível.

Com base nestes resultados, seleccionam-se que três valores de graus-dias, 987 GD, 1570 GD e 1924 GD para caracterizar as três zonas climáticas de inverno I1, I2 e I3. A estes graus-dias correspondem os seguintes valores de radiação solar disponível na superfície orientada a Sul: 744,0, 850,0 e 912,5 [kWh/m²]. A duração da estação de aquecimento para estas três localizações corresponde a 4,8, 6,8 e 7,3 meses, respetivamente. A seleção destas três regiões permite caracterizar o comportamento das edificações em diferentes zonas climáticas deste país, sem no entanto aumentar substancialmente a quantidade de localidades a serem simuladas.

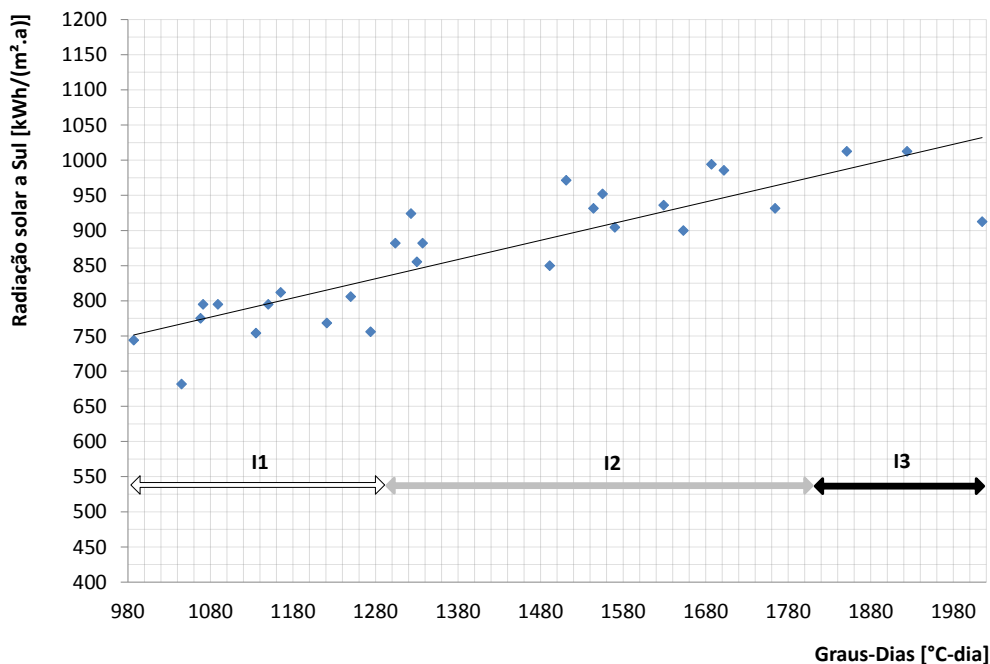


Figura 3.16. Relação entre os graus-dias de aquecimento e radiação solar a sul para diferentes regiões de Portugal continental.

A partir destes dados, para a superfície orientada a sul, e utilizando os fatores de orientação definidos para o clima português, obtêm-se os valores de radiação solar para as restantes orientações. A Tabela 3.8 lista a radiação disponível para cada zona climática e orientações principais (X é o fator de orientação de acordo com [16]).

Tabela 3.8. Radiação solar [kWh/(m².a)] para três regiões e orientações.

Localização	Orientação (onde X é o fator de orientação)		
	Sul ($X=1,00$)	Norte ($X=0,27$)	Oeste/Leste ($X=0,56$)
987 GD	744,0	200,9	416,6
1570 GD	904,5	244,2	506,5
1924 GD	1012,5	273,4	567,0

O método sazonal [69], adotado em Portugal, assume o uso permanente dos equipamentos de climatização ao longo das estações de aquecimento e arrefecimento para cálculo das necessidades **nominais** de energia. Na medida que não considera o comportamento dos ocupantes, o método não reflete os hábitos de climatização dos portugueses e, por conseguinte, necessidades **reais** de energia. Normalmente, as pessoas não ocupam e/ou não aquecem a habitação todo o tempo, além de não climatizarem compartimentos onde não permanecem. Sendo assim, é recomendável aplicar fatores de redução de consumo das necessidades **nominais** de energia útil para aquecimento, inicialmente identificadas pelo método sazonal, evitando-se, assim, estimativas irreais de potenciais poupanças de energia, advindas da implementação de medidas de eficiência energética.

O presente método adota uma abordagem baseada no consumo **real** de energia. Assim, torna-se necessário aplicar fatores de redução de consumo às estimativas do método sazonal para se gerarem estimativas de desempenho energético da habitação mais próximas da realidade. Neste trabalho são estabelecidos fatores de redução:

- Com base em estudo comparativo entre o método sazonal e o dinâmico, após ter sido estabelecido um determinado perfil de ocupação;
- Com base em estatísticas de consumo efetivo atual;
- Para se ter em conta a crescente procura por condições de conforto, acrescentando valor às estatísticas de consumo efetivo atual.

Para se estabelecer uma estimativa de consumos efetivos, utilizam-se duas fontes de dados abrangentes, em Portugal: o Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico (ICESD) [17], publicado em 2011 pelo Instituto Nacional de Estatística e a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) e o Sistema de Certificação Energética (SCE) [49]. Os dados estatísticos provenientes do ICESD confirmam que os hábitos de climatização dos portugueses

correspondem a consumos de energia útil bastante inferiores aos valores de necessidades **nominais** estimados através do método sazonal. O ICESD permite aferir valores **reais** de consumo de energia final em edifícios com diversos usos, nomeadamente o aquecimento, arrefecimento e preparação de AQS.

Considerando-se a recente tendência de uso crescente de sistemas elétricos de aquecimento e de aumento da sua eficiência, opta-se por usar esta fonte de energia como referência. De acordo com o ICESD, 51,7% dos alojamentos utilizaram eletricidade para aquecimento, em 2010. No ICESD, o consumo anual de eletricidade para aquecimento por alojamento era de 418,6 [kWh] (0,036 [tep]), em habitações com áreas média totais de 106,6 [m²] e áreas médias aquecidas de 50,6 [m²] (47,5% da área total). Assim, o consumo **real** de energia final anual era de 8,3 [kWh/m²], na área efetivamente aquecida.

De acordo com o SCE, o consumo anual de energia útil para aquecimento por alojamento é de 117,7 [kWh/m²] e a eficiência média dos sistemas de aquecimento é de 1,91, resultando num consumo de energia final anual de 61,6 [kWh/m²]. Estabelecendo-se uma relação entre os dados das duas fontes de informação, o consumo de energia final anual por alojamento identificado pelo ICESD representa **13,4%** do identificado pelo SCE.

Qualquer que seja o fator de redução aplicado às necessidades de energia útil, inicialmente estimadas pelo método sazonal em cada caso de estudo, este mesmo percentual é também aplicado aos respetivos limites estabelecidos pela regulamentação portuguesa em vigor, obviamente.

Alguns resultados da SDE e detalhes dos edifícios de referência utilizados nos casos de estudo do capítulo 4 são apresentados no *Anexo I – Quadro dos edifícios existentes em estudo – dimensões e características gerais*, no *Anexo II – Quadro dos edifícios existentes – desempenho* e no *Anexo IV – Quadro exemplo de medidas de eficiência – necessidades de energia*, no formato que exige o Regulamento Delegado n.º 244/2012 [10].

3.5 Simulação de Rentabilidade de Medidas (SRM)

No Regulamento Delegado n.º 244/2012 [10], o custo global de medidas de eficiência sob o critério do Valor Atualizado Líquido (VAL) considera *cash flows*, o que implica converter futuras quantias a serem pagas em valores correspondentes ao momento presente. É uma técnica útil para análise do investimento num horizonte temporal mais alargado. Contudo, depende da definição de uma taxa de desconto para atualizar valores. Por sua vez, o investidor necessita de outros critérios que relacionem o montante de capital investido ao retorno do investimento em medidas de eficiência energética. A tomada de decisão deve ser baseada em informações abrangentes que possibilitem a avaliação do risco e da incerteza, para aclarar as opções reais do investimento em reabilitação energética.

A fim de determinar as vantagens da reabilitação energética para os investidores, o presente método avalia o custo global sob o critério do VAL, bem como o critério do retorno sobre o

investimento (ROI) e as opções reais relativos às medidas de eficiência energética. Na reabilitação energética, o capital investido em medidas é remunerado pelas poupanças de energia. Assim, o ROI é a relação entre a quantidade de capital economizado como resultado do investimento numa iniciativa de reabilitação energética e a quantidade de capital investido. Desta forma, no cálculo do ROI subtrai-se o ganho obtido a partir do investimento pela quantia empregada neste investimento e divide-se o resultado novamente pela quantia gasta com o investimento.

As opções reais representam o direito (ou possibilidade) de se alterar um projeto ou investimento em curso, ao longo do tempo. As opções reais incluem a opção de diferir (ou adiar) uma decisão, abandonar, contrair, expandir ou trocar um investimento. A sua avaliação implica a revisão constante da capacidade ótima deste investimento. Para tanto, a análise das opções reais estende os métodos tradicionais de avaliação de projetos e investimentos, como o VAL. A aplicação destes critérios é explicada em maiores detalhes, a seguir.

3.5.1 Custo global e o critério do Valor Atualizado Líquido (VAL)

Seguindo o que preconiza o Regulamento Delegado n.º 244/2012 [10], a SRM deve considerar um ciclo de vida de 30 anos ($\tau = 30$) para edifícios de uso residencial. Propõe-se que na perspetiva macroeconómica, o custo global, GC , seja expresso em termos do valor inicial no ano, acrescido do valor residual descontado, de acordo com a seguinte expressão:

$$GC = \sum_{j=0}^J \left[\sum_{i=0}^{\tau} IC_{i,j} \cdot D_i + EC_{i,j} \cdot D_i + GHG_{i,j} \right] \quad [€/m^2] \quad (22)$$

em que J é o conjunto de medidas (onde $j = 0$ corresponde ao edifício de referência, sem medidas), referentes ao ano de início, $i = 0$, e sendo τ o período de cálculo. $IC_{i,j}$ representa os custos de investimento e $EC_{i,j}$ os custos de energia para o conjunto de medidas j , durante o ano i , ambos afetados pelo fator de desconto, D_i . O custo de emissão de GEE é expresso por $GHG_{i,j}$, custo esse não considerado na perspetiva financeira. O fator de desconto no ano i , D_i , é calculado com base na taxa de desconto real R , a partir da seguinte fórmula:

$$D_i = \left(\frac{1}{1 + R/100} \right)^i \quad (23)$$

Na determinação do custo global de uma medida, no cálculo na perspetiva macroeconómica, os preços a ter em conta são os valores pagos pelo cliente, excluindo IVA (imposto sobre o valor acrescentado) e outros impostos aplicáveis. Por outro lado, na perspetiva financeira são considerados impostos e taxas. Em ambas as perspetivas não são incluídos subsídios para as várias medidas, bem como quaisquer subvenções para os preços da energia.

Os custos de investimento para o edifício de referência e os seus componentes, $IC_{i,j}$, resultam de um conceito amplo de custo investimento total, através da soma de custos de investimento inicial, $I_{i,j}$, custos de manutenção, $M_{i,j}$, de substituição, $R_{i,j}$, e da subtração do valor residual, $V_{i,j}$:

$$IC_{i,j} = (I_{i,j} + M_{i,j} + \delta_{i\tau_L} R_{i,j} - \delta_{i\tau} V_{i,j}) \quad [€/m^2] \quad (24)$$

onde δ_{nm} é o símbolo delta de Kronecker, que toma os seguintes valores:

$$\delta_{nm} = \begin{cases} 0, & \text{if } n \neq m \\ 1, & \text{if } n = m \end{cases} \quad (25)$$

Todos os custos de investimento dos casos de estudo consideram valores médios de mercado [114]. Neste cálculo, os custos de substituição, $R_{i,j}$, associados a cada conjunto de medidas, são adicionados apenas no final do seu respetivo ciclo de vida útil τ_L . Assim, é considerado um período de: 50 anos ($\tau_L = 50$) para isolamento, 40 anos ($\tau_L = 40$) para janelas e 20 anos ($\tau_L = 20$) para todos os sistemas, incluindo FER. Do mesmo modo, o valor residual, $V_{i,j}$, é subtraído apenas no final do período de cálculo τ .

Nos casos estudados, os custos de investimento, $IC_{i,j}$, resultam da soma das medidas que abrangem mudanças em 4 elementos (isolamento, janelas, sistemas e sistemas de energias renováveis), identificado pelos subscritos *ins*, *win*, *sys* e *res*, respetivamente. Por exemplo, os custos de investimento inicial, $I_{i,j}$, resultam da seguinte expressão:

$$I_{i,j} = (I_{ins,i} + I_{win,i} + I_{sys,i} + I_{res,i}) \quad [€/m^2] \quad (26)$$

Por sua vez, $I_{ins,i}$ (investimento em isolamento) resulta da soma dos 3 elementos da envolvente que são alterados, identificado pelos subscritos *insroof*, *inswalls* e *insfloor* respetivamente cobertura, paredes e pavimento, conforme:

$$I_{ins,i} = (I_{insroof,i} + I_{inswalls,i} + I_{insfloor,i}) \quad [€/m^2] \quad (27)$$

O investimento em isolamento da envolvente considera o limite inferior de preços como base para a SRM. O limite superior de preços é utilizado na ASP, para verificação do comportamento dos níveis ótimos de rentabilidade neste cenário.

Da mesma forma, $I_{sys,i}$ (sistemas) e $I_{res,i}$ (sistemas de energia renováveis) resultam da soma dos custos de investimento em sistemas (ver Tabelas 3.3 e 3.6) que são substituídos ou implementados, identificados pelos subscritos *h*, *w* e *r*, respetivamente aquecimento da área habitável, preparação de AQS e FER, de acordo com:

$$I_{sys,i} = \sum_{k=1}^K (I_{h,i,k} + I_{w,i,k}) \quad , \quad I_{res,i} = \sum_{k=1}^K I_{r,i,k} \quad [€/m^2] \quad (28)$$

O mesmo procedimento é aplicado aos demais parâmetros de $IC_{i,j}$: $M_{i,j}$, $R_{i,j}$ e $V_{i,j}$.

Os estudos de rentabilidade económica estão dependentes da evolução dos preços da energia que é estimada pela UE e está prevista até 2050 [58]. Os custos de energia, $EC_{i,j}$, resultam da soma de custos de energia para aquecimento, $EC_{h,i}$, e custos de energia para preparação de AQS, $EC_{w,i}$:

$$EC_{i,j} = (EC_{h,i} + EC_{w,i}) \quad [€/m^2] \quad (29)$$

Os custos de energia para aquecimento e água quente sanitária, $EC_{h,i}$ e $EC_{w,i}$, resultam da energia final, $FE_{h,i}$ e $FE_{w,i}$, respetivamente, multiplicada pelo custo da fonte de energia utilizada por cada um dos sistemas, $C_{ele,i}$, $C_{gas,i}$ e $C_{pel,i}$ (correspondente a eletricidade, gás e *pellets*), numa determinado ano i , da seguinte forma para o aquecimento:

$$EC_{i,h} = \begin{cases} FE_{h,i} \delta_{k1} C_{ele,i} \\ FE_{h,i} \delta_{k2} C_{ele,i} \\ FE_{h,i} \delta_{k3} C_{pel,i} \\ FE_{h,i} \delta_{k4} C_{gas,i} \end{cases} \quad [€/m^2] \quad (30)$$

e da seguinte forma para preparação de AQS:

$$EC_{i,w} = \begin{cases} FE_{w,i} \delta_{k1} C_{gas,i} \\ FE_{w,i} \delta_{k2} C_{gas,i} \\ FE_{w,i} \delta_{k3} C_{pel,i} \\ FE_{w,i} \delta_{k4} C_{gas,i} \end{cases} \quad [€/m^2] \quad (31)$$

As necessidades líquidas de energia final, $FE_{h,i}$ e $FE_{w,i}$, após a subtração das contribuições de FER, são obtidas assumindo os sistemas selecionados para aquecimento e de preparação de AQS (Tabela 3.3) e sistemas de FER (Tabela 3.6). Considerando as particularidades sobre a relação entre os sistemas convencionais e FER, $FE_{h,i}$ e $FE_{w,i}$ são calculadas como se segue:

$$FE_{h,k} = \frac{f_{h,k} E_{h,k}}{\eta_{h,k}} - \delta_{k3} E_{r,k} \quad [kWh/(m^2.a)] \quad (32)$$

$$FE_{w,k} = \frac{(f_{w,k} E_{w,k}) - \delta_{k1} E_{r,k} - \delta_{k2} E_{r,k}}{\eta_{w,k}} \quad [kWh/(m^2.a)] \quad (33)$$

Os custos de energia, $C_{ele,i}$, $C_{gas,i}$ e $C_{pel,i}$, são afetados por um fator de reajuste $fC_{ele,i}$ (neste método, é considerado o mesmo para o gás e *pellets*):

$$C_{ele,i} = \begin{cases} C_{ele,i}, & i = 1 \\ C_{ele,i} fC_{ele,i}, & 1 < i \leq 30 \end{cases} \quad [\text{€/kWh}] \quad (34)$$

de acordo com os seguintes índices de reajuste [58]:

$$fC_{ele,i} = \begin{cases} 1,0349, & i < 5 \\ 1,0000, & 5 \leq i < 10 \\ 1,0040, & 10 \leq i < 15 \\ 1,0000, & 15 \leq i < 20 \\ -1,0058, & 20 \leq i < 25 \\ -1,0020, & 25 \leq i \leq 30 \end{cases} \quad (35)$$

Os custos de energia (2015) associados ao preço da eletricidade (€ 0,2390) e do gás natural (€ 0,1032) foram obtidos através da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) [125] e da análise de faturação. O portal da ERSE oferece dados de 2015, mas são apresentados diferentes preços em função do fornecedor e os valores são finais, incluindo todas as taxas. Para desagregar os valores e obter os custos a utilizar na perspetiva macroeconómica, é utilizada a explicação contida em [126].

Na perspetiva financeira, para clientes em baixa tensão, com potências entre 2,3 e 20,7 [kVA], o custo do [kWh] era, para o ano de 2015, de € 0,1555 [127]. A este valor acresce na fatura do cliente final uma taxa relativa à potência contratada (que varia em função da potência e não tem relação com a quantidade de energia consumida), uma taxa de exploração [128], a qual também não tem relação com a quantidade de energia consumida e um imposto especial sobre o consumo de eletricidade, com o valor de € 0,001 por [kWh] consumido.

Com base na consulta de um conjunto de faturas de eletricidade de residências com potência contratada de 4,6 [kVA] e assumindo consumo mensal de 240 [kWh], verifica-se que a soma dos custos com taxas conduz a um valor de € 0,1943 por [kWh], ao qual deverá ser somado o IVA de 23%, elevando este valor para € 0,2390 por [kWh]. No entanto, este valor pode sofrer alterações de consumidor para consumidor devido à existência de duas parcelas independentes da quantidade de energia consumida. Embora o custo em [€/kWh] seja variável em função da potência contratada e do consumo efetivo, assumiu-se o presente valor nos cálculos da SRM.

Para a desagregação dos preços do gás natural, é utilizada a explicação que consta em [125] e retirados os valores da análise de faturas. O custo relativo aos *pellets* foi determinado com recurso a orçamentos do mercado de especialidade.

A fim de determinar o custo do carbono, são utilizados os preços que estão definidos no Regime de Comércio de Licenças de Emissão da UE (RCLE-UE) e considerados os fatores de emissão padrão de CO₂ para cada intervenção construtiva proposta. Os fatores de conversão de energia primária para emissões de CO₂ aplicados à energia elétrica são 0,144 [kgCO₂/kWh_{EP}] e 0,202

[kgCO₂/kWh_{EP}] para o gás natural, segundo o Despacho 15793-D/2013 [16]. Para fontes de energia renováveis (*pellets*, por exemplo), o fator de conversão de energia primária para emissões de CO₂ é nulo.

Relativamente à taxa de desconto, a qual é função do grau de risco dos fluxos de caixa estimados, apresenta normalmente taxas mais elevadas para ativos mais arriscados [95]. Neste trabalho, assume-se 6% para a perspetiva financeira, percentual esse atualmente compatível com taxas de financiamento disponíveis para projetos de reabilitação, em Portugal [129]. Na perspetiva macroeconómica, adota-se a taxa de 3%, exigida no Regulamento Delegado n.º 244/2012 [10].

3.5.2 Opções reais e o critério do Retorno sobre o Investimento (ROI)

Quanto às opções reais associadas aos investimentos em reabilitação energética, o método considera que os proprietários de edifícios podem decidir pelo diferimento, abandono, contração, expansão ou troca de determinada medida de isolamento da construção, aquecimento e arrefecimento do ambiente, preparação de águas quentes sanitárias ou produção e uso de energias renováveis *in loco* (ver Figura 3.17), conforme o ROI associado a cada solução e tendo em conta requisitos mínimos regulamentares.

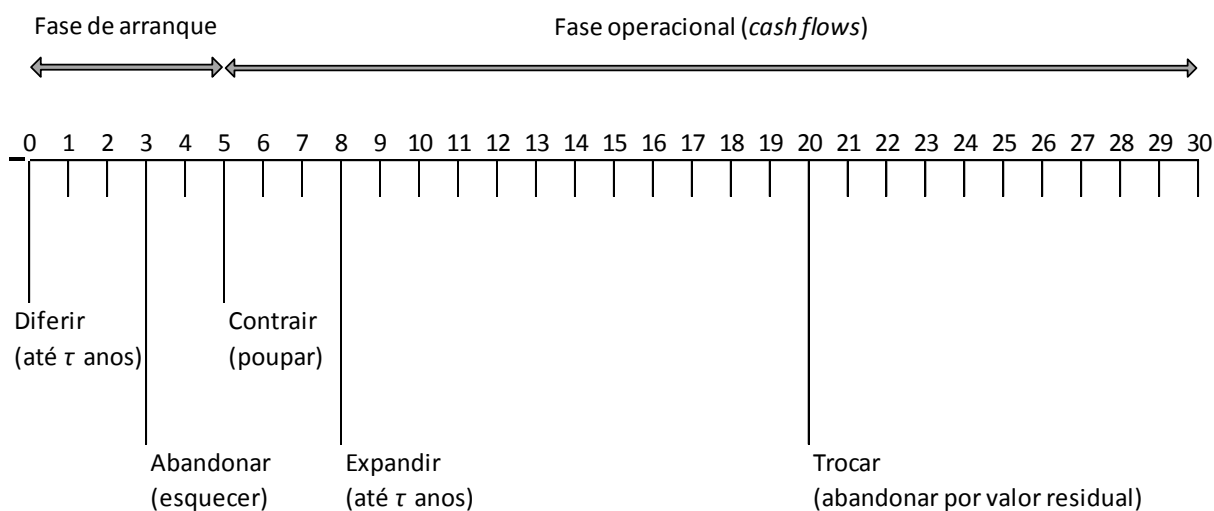


Figura 3.17. Exemplo de opções reais (fonte: Trigeorgis [111]).

- **Opção de espera ou diferimento**

Quando não existe exigência regulamentar, o proprietário do edifício pode adiar a implementação de uma determinada medida de eficiência energética. O momento ótimo do investimento é fácil de determinar quando não existe incerteza, pois é suficiente calcular o VAL associado a cada medida e a diversas datas de começo (arranque) e selecionar o que apresentar valor superior. Porém, esta regra simples é quebrada num contexto de incerteza [98].

Um exemplo é a incerteza das taxas de juro futuras que afetam a taxa de desconto, utilizada também como taxa de retorno requerida. Esta incerteza é potencializada quando analisada em conjunto com diferentes cenários para evolução dos preços de energia, uma vez que esta combinação determinará a atratividade de uma medida específica de eficiência energética. Conforme montante de poupança estimada com custos de energia, uma medida que não seja aceitável agora pode vir a ser no futuro. Este diferimento é mais atrativo quando a incerteza é grande. Em pacotes que apresentam a possibilidade de serem divididos em vários anos de implementação, as variações de custos de investimento e operação, além da potencial economia de energia, podem fazer com que o proprietário do edifício decida por dividir tal pacote de medidas de eficiência numa sequência de opções de espera, aguardando o momento de investimento mais apropriado para cada uma destas medidas.

Por exemplo, a substituição de sistemas pode implicar um valor de espera, especialmente no caso de troca de combustível. No caso dos preços altamente voláteis e rapidamente crescentes, a espera torna-se uma opção mais rentável (e, portanto, de preferência). Entretanto, não há valor de espera na reabilitação energética da envolvente quando os aumentos de preços de energia permanecem moderados e suaves [94].

- **Opção de abandono ou troca**

Tecnicamente, abandono é quando o decisor opta pela saída do projeto ainda na fase de arranque do investimento, enquanto troca é a saída já na fase operacional. O momento ótimo desta saída é equivalente ao ponto em que, na comparação de *cash flows* futuros esperados, o valor de abandono imediato apresenta o maior valor atualizado. No caso dos investimentos em reabilitação, a opção de abandono faz pouco sentido e, uma vez que o valor da troca consiste na venda de ativos, através da qual se pode obter um encaixe monetário, no montante do valor residual destes ativos, esta opção não representa uma alternativa viável.

Entretanto, num contexto mais amplo, o abandono dá-se de forma natural quando ocorre a venda do edifício onde foram feitos os investimentos em reabilitação energética. Diferentemente de uma reabilitação estrutural ou meramente estética, onde o valor agregado ao património representado pelo imóvel pode ser algo mensurado, no caso da reabilitação energética, este valor adicionado é de difícil contabilização [92], se restringindo à melhor classificação energética alcançada, não aplicável aos casos dispensados da exigência regulamentar de certificação energética, como edifícios muito antigos ou de valor histórico, por exemplo.

- **Opção de contração ou expansão**

A opção de expansão encontra grandes aplicações em projetos pilotos e em projetos de investigação e desenvolvimento. Estes projetos podem ter VAL desfavorável, num primeiro momento, mas serem bastante valiosos, já que com investimento relativamente pequeno, se pode obter informações que levem a investimentos de maior porte e com menor incerteza técnica.

Em reabilitação energética, isto pode ser traduzido, por exemplo, pela aplicação de isolamento em módulos ou em fases com monitorização através de auditorias técnicas. É bastante perceptível a evolução que os programas de simulação energética experimentaram, nos últimos anos, mas as auditorias proporcionam dados reais para o edifício em estudo, reduzindo significativamente as incertezas técnicas e fornecendo argumentos para a expansão do investimento. Se a fase experimental apresentar resultado desfavorável, os decisores podem não investir em etapas subsequentes, contraindo o investimento inicialmente planeado.

O presente método incorpora a função objetivo do valor atualizado de investimento, o que permite a análise do ROI. Este investimento (adicional), AI , consiste no valor total investido em medidas de eficiência energética que superam os custos para manter o cenário *business as usual* (BAU).

Considera-se, portanto, que mesmo o cenário BAU necessitará de investimento para a manutenção e substituição dos sistemas já presentes no edifício, durante o ciclo económico em estudo. Este gasto não pode ser caracterizado como investimento em intervenção, pois trata-se de um desembolso de capital necessário para, simplesmente, manter o cenário inicial, já que todos os componentes de um edifício têm um ciclo de vida definido.

O investimento adicional, $AI(\tau)$, referindo-se ao ano de início, $i = 0$, sobre o período de cálculo τ , resulta dos custos de investimento, $IC_{i,j}$, durante o ano i , por medida ou conjunto de medidas j , menos $IC_{BAU,i,0}$, que representa valores correspondentes para o cenário BAU. Estes valores são descontados ao ano de início, $i = 0$, de acordo com um fator de desconto D_i . Para o cálculo na perspectiva financeira, tendo um período $\tau = 30$ anos:

$$AI(\tau) = \sum_{j=1}^J \left[\sum_{i=0}^{\tau} IC_{i,j} D_i \right] - \left[\sum_{i=0}^{\tau} IC_{BAU,i,0} D_i \right] \quad [€/m^2] \quad (36)$$

Alguns resultados da SRM para os edifícios de referência utilizados nos casos de estudo do capítulo 4 são apresentados no *Anexo V – Quadro exemplo de medidas de eficiência – custo global e ROI*, no formato que exige o Regulamento Delegado n.º 244/2012 [10].

3.6 Análise de Sensibilidade de Parâmetros (ASP)

No sentido de se realizar uma ASP, opta-se por avaliar a variação dos resultados em função dos seguintes parâmetros: necessidades de energia útil em função dos efetivos hábitos de consumo, diferentes evoluções dos custos de energia e taxas de desconto. A avaliação da influência da variabilidade de todos estes fatores revela-se de extrema importância para se ter a perceção da amplitude do seu impacto nos resultados, em diferentes cenários.

Como os cálculos básicos da SDE consideram fatores de redução em relação ao método sazonal para se obter necessidades **reais** de energia útil, na ASP de cada caso de estudo, é calculado o cenário para 100% das necessidades **nominais** estimadas por este método. Esta análise permite a compreensão de como são sobrestimadas as necessidades energéticas **nominais** calculadas pelo método sazonal em comparação com o consumo **real** médio de energia, uma vez que as residências não são permanentemente ocupadas e climatizadas como assumido neste método.

Como a evolução dos preços da energia em longo prazo sugerida pelo Eurostat [58] (ver *Anexo VI – Quadro dos custos de energia*) é considerada demasiadamente otimista, dado o que ocorreu nos últimos anos em Portugal (por exemplo, um aumento de 4% do preço da eletricidade entre 2010 e 2011 [130]), estuda-se também um cenário de aumento linear de 2,5% ao ano para os tipos de energia utilizados nas simulações (energia elétrica e gás).

Esse desenvolvimento reflete os impactos de um maior aumento do preço da energia no futuro. Os preços da energia são uma importante variável de cálculo, uma vez que influenciam a potencial poupança de recursos a ser proporcionada pelas medidas consideradas.

Na Figura 3.18, é possível verificar a significativa diferença nos cenários de evolução dos preços de energia utilizados nesta análise de sensibilidade.

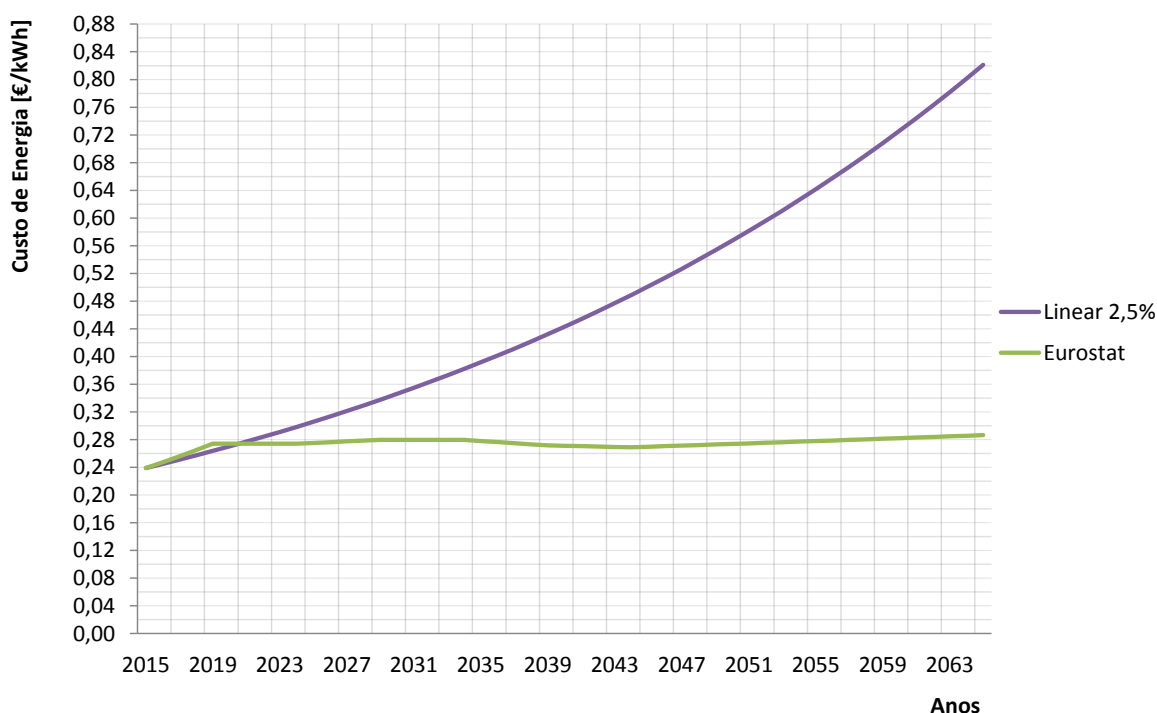


Figura 3.18. Cenários para evolução dos preços de energia.

Pelo facto da SRM utilizar as taxas de desconto de 3%, na perspetiva macroeconómica, e de 6%, na financeira, na ASP são consideradas as taxas de 6% e 12%, respetivamente, permitindo analisar o comportamento da rentabilidade de medidas em cenário muito mais desfavorável. Os referidos parâmetros encontram-se resumidos no Tabela 3.9.

Tabela 3.9. Síntese das taxas de desconto.

<i>Perspetiva</i>	<i>Cenário</i>	<i>Taxa de desconto</i>
Macroeconómica	Atual	3%
	Desfavorável	6%
Financeira	Atual	6%
	Desfavorável	12%

3.7 Procedimento expedito para indicação de rentabilidade

Como já referido, uma das grandes dificuldades dos estudos de rentabilidade é que o agrupamento de soluções individuais de rentabilidade ótima num único pacote, não garante que este pacote represente a rentabilidade ótima global (CO_G , *cost-optimal*). Por exemplo, a soma das opções mais rentáveis de isolamento de cobertura, paredes e pavimento (CO_I) com as melhores opções de janelas (CO_W), de sistemas de aquecimento da área habitável e de águas quentes sanitárias (CO_S) e de sistemas baseados em fontes de energia renováveis (CO_R) pode não representar o pacote de rentabilidade ótima, para o ciclo económico considerado:

$$CO_G \neq (CO_I + CO_W + CO_S + CO_R) \quad (37)$$

Isto deve-se, principalmente, ao facto de que a interação entre custo e espessura de isolamento, custo de operação e eficiência do sistema de aquecimento, é determinante para os cálculos de rentabilidade [110]. Além disso, a possibilidade de que alguns sistemas convencionais desempenhem múltiplas funções (aquecimento e arrefecimento da área habitável e preparação de AQS) adiciona complexidade aos cálculos.

No entanto, se considerarmos as especificidades do clima e, principalmente, preços de mercado para as soluções estudadas em cada país, é possível estabelecer um procedimento expedito para indicação de rentabilidade e redução da quantidade de variáveis a serem utilizadas nas simulações.

Por exemplo, no caso de Portugal e conforme a sua regulamentação, é permitido considerar nulas as necessidades de arrefecimento, quando se assegura que o risco de sobreaquecimento é mínimo. Além disso, apenas 0,5% da energia gasta no consumo doméstico é utilizada para arrefecimento [17]. A eliminação das necessidades de arrefecimento possibilita estudar o desempenho económico dos sistemas convencionais somente nas funções de aquecimento da área habitável e preparação de AQS.

Em estudos preliminares, a comparação da rentabilidade de sistemas (sejam eles convencionais ou baseados em FER), em euros por quilowatt-hora [€/kWh] de energia útil produzida, mostrou-se bastante eficaz, na seleção de equipamentos a serem utilizados nos cálculos de rentabilidade.

Assim, o investimento em sistemas torna-se dominante sobre o investimento em isolamento e faz com que a opção de isolamento de rentabilidade ótima varie conforme o equipamento de aquecimento considerado. Para a análise económica do material de isolamento, é suficiente a seleção com base em euros por resistência térmica [$\text{€}/r$]. A eliminação das necessidades de arrefecimento diminui também a relevância das janelas nos cálculos de necessidades energéticas do edifício, pois sua maior influência dá-se na estação de arrefecimento, como já foi demonstrado em estudos anteriores para Portugal ([110], [131], [132]).

A seguir, são demonstradas as interações entre isolamento de cobertura, paredes exteriores e pavimento com janelas e sistemas de aquecimento da área habitável para um edifício construído antes de 1960, com 80 [m^2] de área habitável, localizado no centro de Portugal. Este edifício passa a servir de **referência** para os cálculos que serão apresentados a partir de agora. Para trabalhar com necessidades **reais** de energia, é aplicado um fator de redução considerando apenas 13,4% das necessidades de energia útil para aquecimento identificadas pelo método sazonal e as necessidades de energia útil para arrefecimento são desconsideradas. A taxa de desconto na perspetiva financeira é de 6%.

A Figura 3.19 ilustra os efeitos do aumento do investimento em isolamento, em cada elemento da envolvente (separadamente) sobre as necessidades de energia útil do edifício. As espessuras de isolamento (9) variam entre 30 e 180mm (da direita para a esquerda, no gráfico).

Observa-se o agrupamento nas medidas de isolamento da cobertura, paredes e pavimento. O edifício na sua configuração original (cenário BAU) sem isolamento, apresenta necessidades de energia útil para aquecimento de 34,44 [$\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{a})$]. Esta análise do gráfico (aqui apresentada para o equipamento já presente no edifício, EE) independe do sistema de aquecimento, uma vez que não é considerada a eficiência do mesmo, por se tratar de energia útil.

Percebe-se que, neste caso, o investimento em isolamento da cobertura é mais efetivo e proporciona maior amplitude de redução das necessidades de energia útil do que o investimento em isolamento de paredes exteriores. O investimento em isolamento térmico do pavimento é o menos efetivo.

A Figura 3.20 mostra como as opções de sistema passam a interagir com o isolamento quando são considerados os custos com energia final, uma vez que esta variável é influenciada pelas eficiências e custos de combustíveis associados aos respetivos equipamentos. Nota-se que, para um mesmo montante de investimento em isolamento, a redução na fatura de energia é mais efetiva para EE ($\eta = 1,0$, $P_{h,k} = 2,5$ - eletricidade), seguido de CG ($\eta = 0,93$, $P_{h,k} = 1,0$ - gás) e AC ($\eta = 4,3$, $P_{h,k} = 2,5$ - eletricidade).

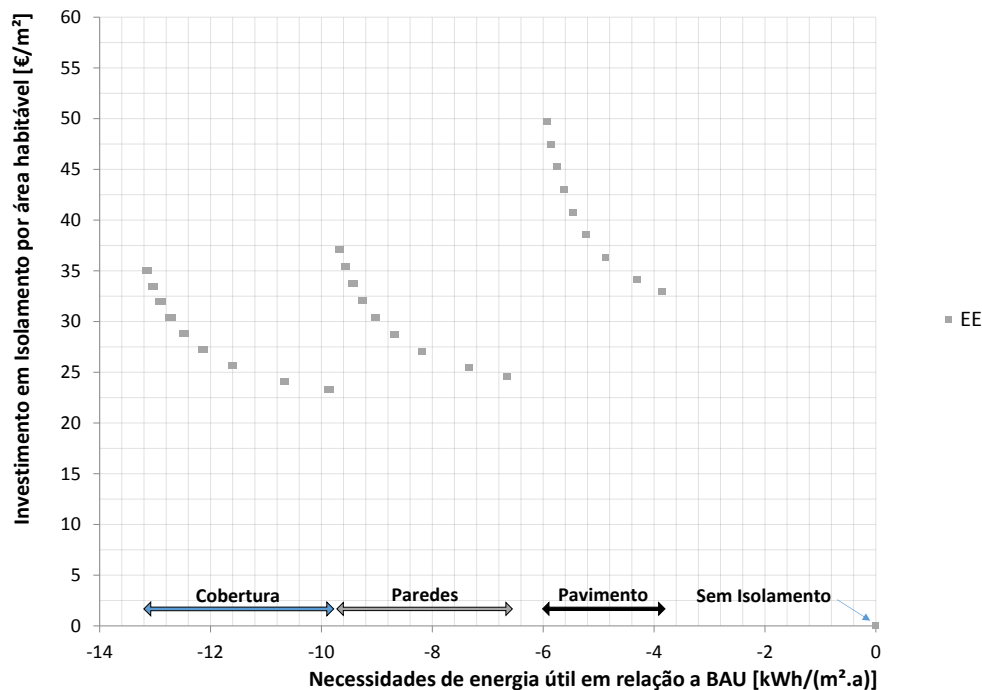


Figura 3.19. Influência do aumento de isolamento térmico nas necessidades de energia útil para aquecimento.

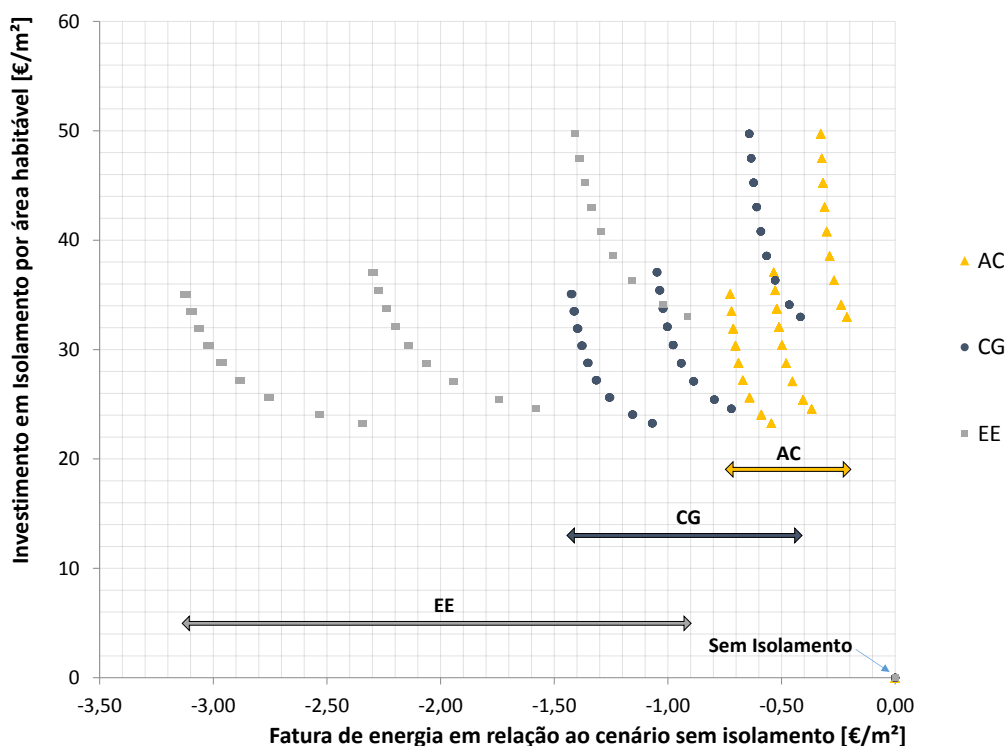


Figura 3.20. Redução na fatura de energia de aquecimento para diferentes sistemas em função do aumento de isolamento térmico.

Obviamente, as faturas de energia para cada um dos três sistemas, em seus respectivos pontos de partida (edifício de referência sem isolamento), são diferentes. O sistema EE consome muito mais energia e, portanto, apresenta maior potencial de redução por intermédio de investimentos em isolamento.

Ou seja, grande parte da fatura de energia já foi reduzida nos cenários em que houve a substituição por CG ou AC, ainda sem qualquer isolamento (canto inferior direito do gráfico), antes de ser afetada pelas potenciais economias em energia final proporcionadas pelo investimento em isolamento.

A Figura 3.21 demonstra a interação entre isolamento e sistemas, agora em termos de custo global durante 30 anos e para diferentes janelas. Nesta análise, a redução das necessidades de energia útil para aquecimento e o custo global são comparados no âmbito de cada janela. Assim, a diferença que aparece no eixo horizontal [x] é proporcionada somente pelo aumento de isolamento, uma vez que cada janela é comparada com ela mesma, num cenário onde não há isolamento e o sistema é o mesmo.

Nota-se que o posicionamento relativo entre janelas se mantém para os três sistemas. Ou seja, como pode ser observado no eixo vertical [y] para $x = 0$, a janela que proporciona o menor custo global será sempre a que já está no edifício de referência ($U_w = 5,100$ [W/(m².°C)]), independente do sistema. Esta relação mantém-se à medida que é adicionado isolamento.

O investimento em isolamento da cobertura, neste caso, é mais efetivo do que em paredes exteriores ou pavimento, também em termos de custo global. No entanto, o menor custo global é obtido sem qualquer isolamento ou substituição de janelas, com o sistema CG (ver canto inferior direito).

Uma vez que seja tomada a decisão de se investir em isolamento, as melhores opções de espessuras para cobertura, paredes exteriores e pavimento estarão sempre associadas ao sistema CG e à janela com $U_w = 5,100$ [W/(m².°C)].

No caso de AC, também o menor custo global é obtido sem isolamento. Já no caso de EE e, obviamente, devido às maiores necessidades de energia deste sistema, o custo global menor é obtido com o isolamento da cobertura em EPS 80mm. Isto comprova que a espessura de isolamento de rentabilidade ótima varia de acordo com o sistema instalado no edifício.

A análise da Figura 3.21 também permite verificar a quase impercetível interação das janelas com o isolamento na redução das necessidades de energia útil, devido ao aparente alinhamento vertical de pontos para cada espessura de isolamento e diferentes janelas.

Isto pode ser melhor observado na Figura 3.22, numa escala diferente e detalhando a influência das diferentes janelas em interação com o isolamento da cobertura.

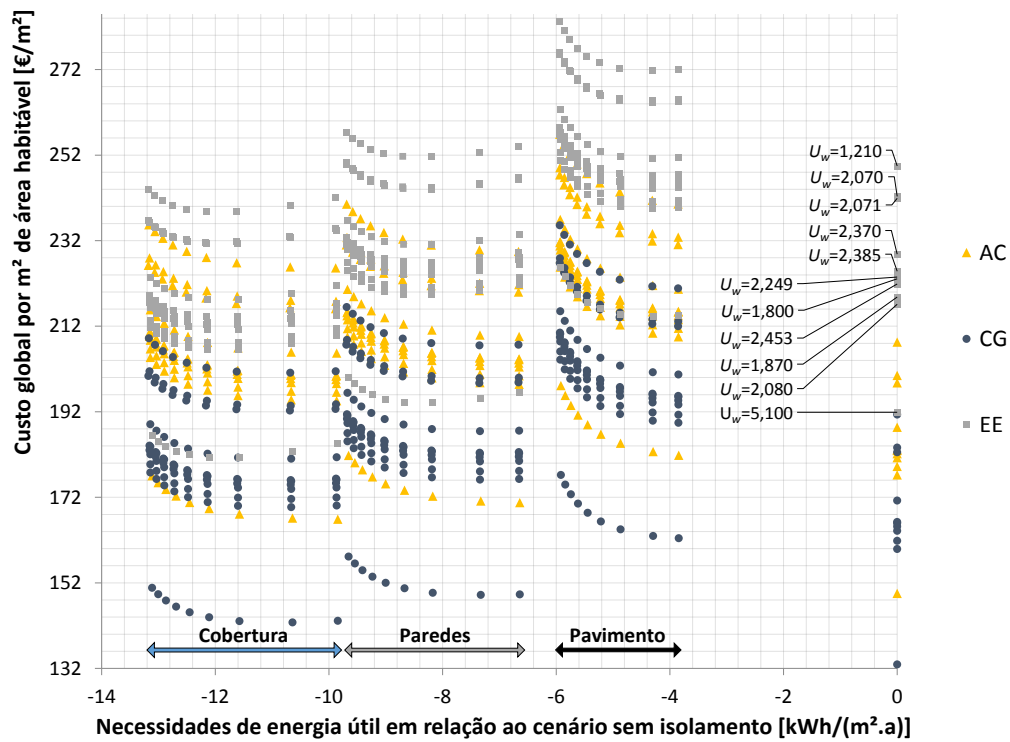


Figura 3.21. Influência do aumento de isolamento térmico em interação com a substituição de janelas, nas necessidades de energia útil para aquecimento e no custo global para diferentes sistemas.

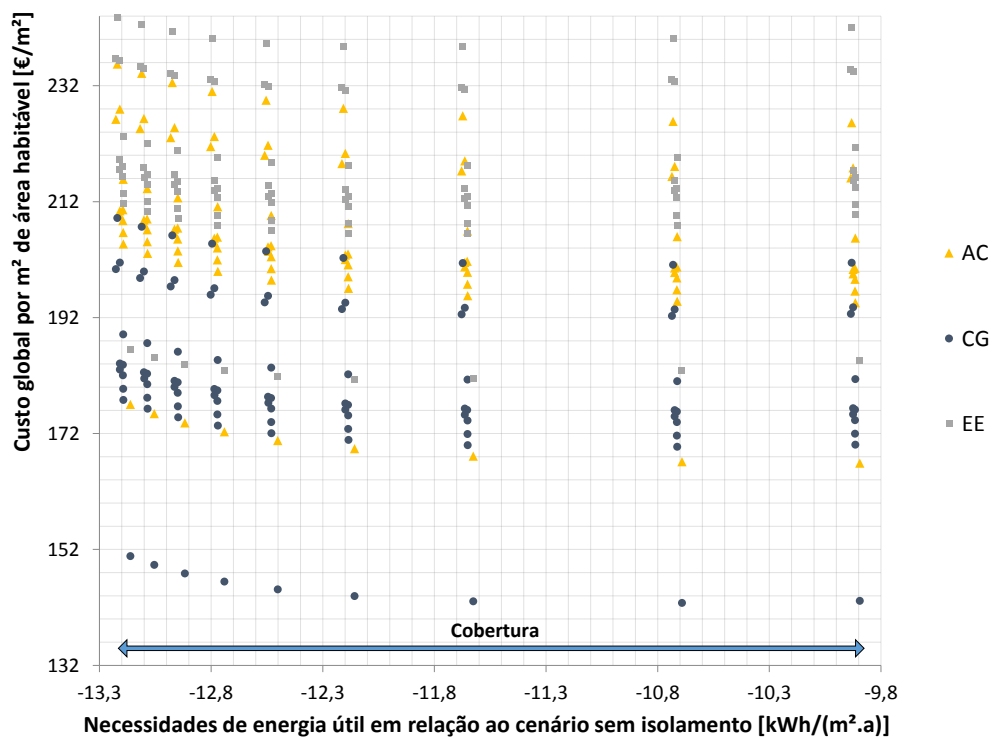


Figura 3.22. Influência das janelas e isolamento da cobertura nas necessidades de energia útil para aquecimento e no custo global para diferentes sistemas.

A Figura 3.23 demonstra a influência das diferentes janelas sem interação com qualquer isolamento. Ou seja, é possível observar o efeito somente da substituição da janela já presente no edifício de referência (BAU). Mais uma vez, nota-se que o posicionamento relativo entre janelas se mantém para os três sistemas. Ou seja, como pode ser observado no eixo vertical [y] para $x = 0$, a janela que proporciona o menor custo global será sempre a que já está no edifício de referência ($U_w = 5,100$ [W/(m².°C)]), independente do sistema.

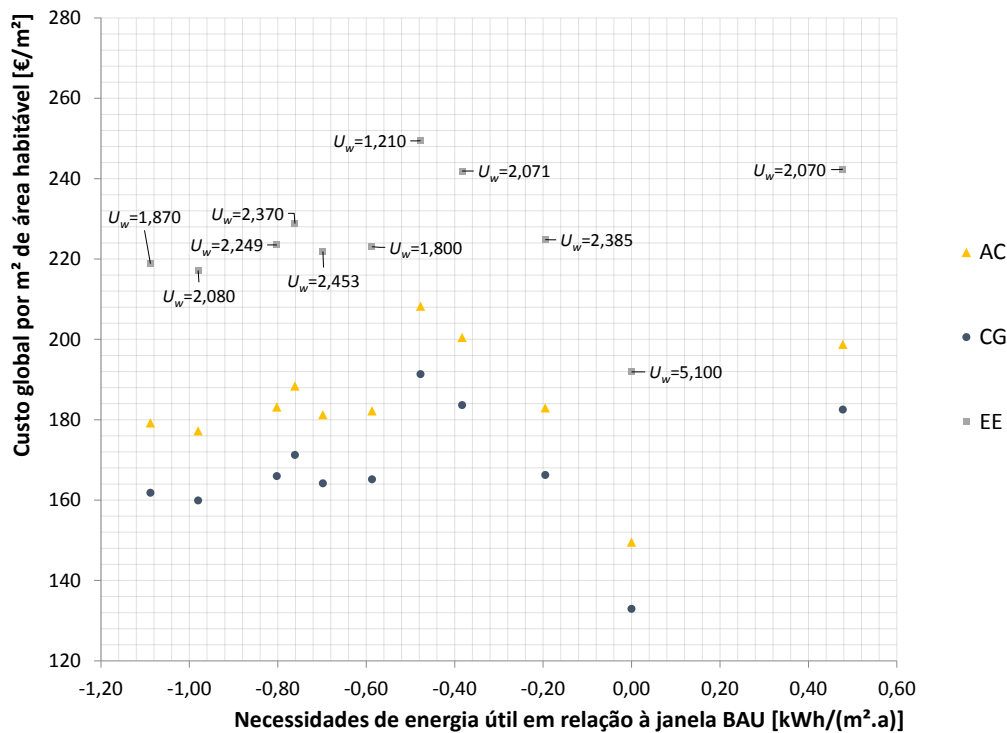


Figura 3.23. Influência das janelas nas necessidades de energia útil para aquecimento e no custo global para diferentes sistemas, em cenários sem isolamento.

Uma vez tomada a decisão de se investir na substituição, a opção com melhor desempenho económico é a janela com $U_w = 2,080$ [W/(m².°C)] e fator solar $g_w = 0,59$. Em relação às necessidades de energia útil, a melhor solução é a janela com $U_w = 1,870$ [W/(m².°C)] e fator solar $g_w = 0,58$, sendo que a janela $U_w = 2,700$ [W/(m².°C)] até mesmo aumenta estas necessidades, devido ao baixo fator solar do seu vidro ($g_w = 0,30$), o que acaba por diminuir os ganhos solares durante a estação de aquecimento.

No caso das janelas, o resultado económico é influenciado pela interação entre resistência térmica, fator solar do envidraçado e, obviamente, o custo de substituição, consoante a estação em estudo (arrefecimento ou aquecimento). Quando analisada a rentabilidade sob a perspetiva financeira do investidor e usando o critério ROI como referência, fica mais claro o desempenho económico desfavorável ao investimento em isolamento térmico. Quanto mais se investe em isolamento, menor é o ROI, não sendo rentável a substituição de janelas, em nenhuma das situações, conforme Figura 3.24.

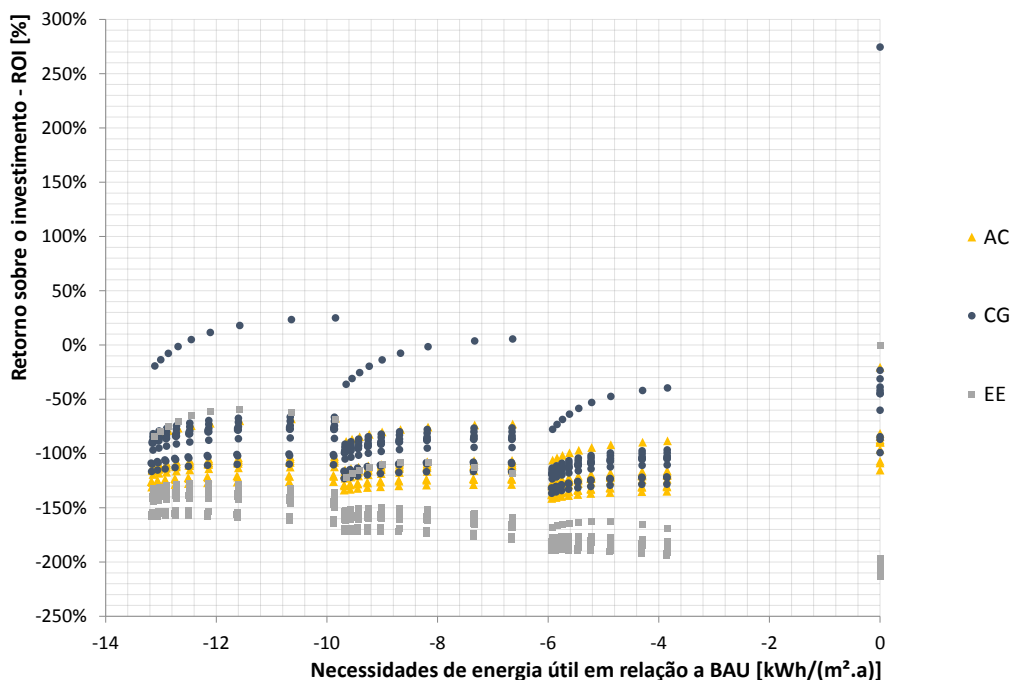


Figura 3.24. Influência das janelas e do isolamento nas necessidades de energia útil para aquecimento e no retorno sobre o investimento para diferentes sistemas.

A Figura 3.25, numa escala diferente, mostra que, no caso do sistema EE, a opção com melhor ROI é a de isolamento da cobertura com EPS de 60mm. Já no caso do sistema CG, na Figura 3.26, mostra-se que a opção com melhor ROI é a de isolamento da cobertura com EPS de 30mm.

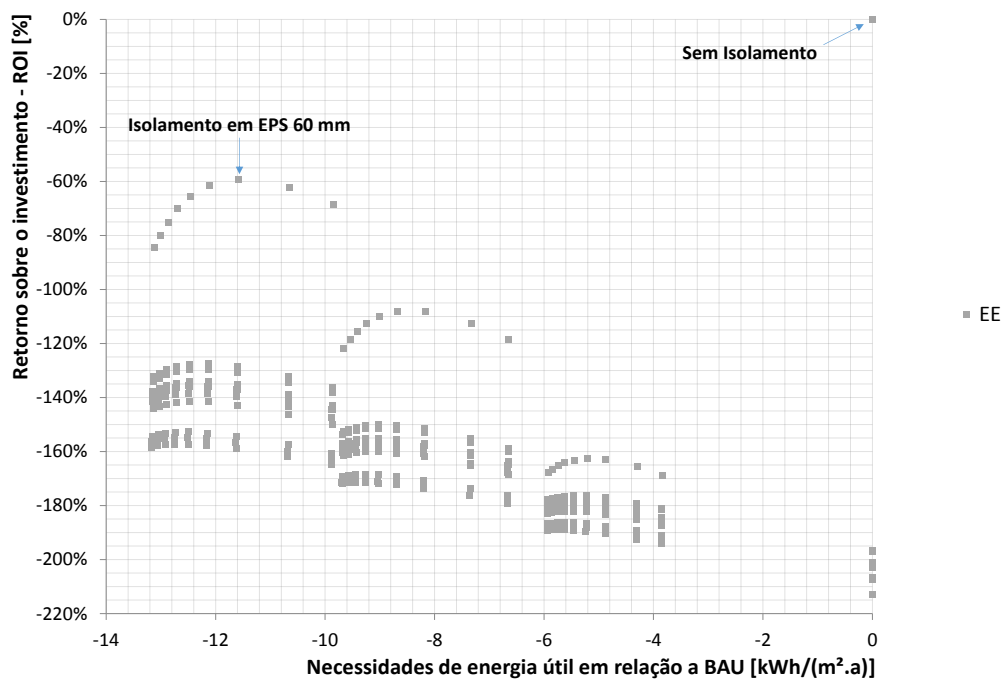


Figura 3.25. Influência das janelas e do isolamento nas necessidades de energia útil para aquecimento e no retorno sobre o investimento para EE.

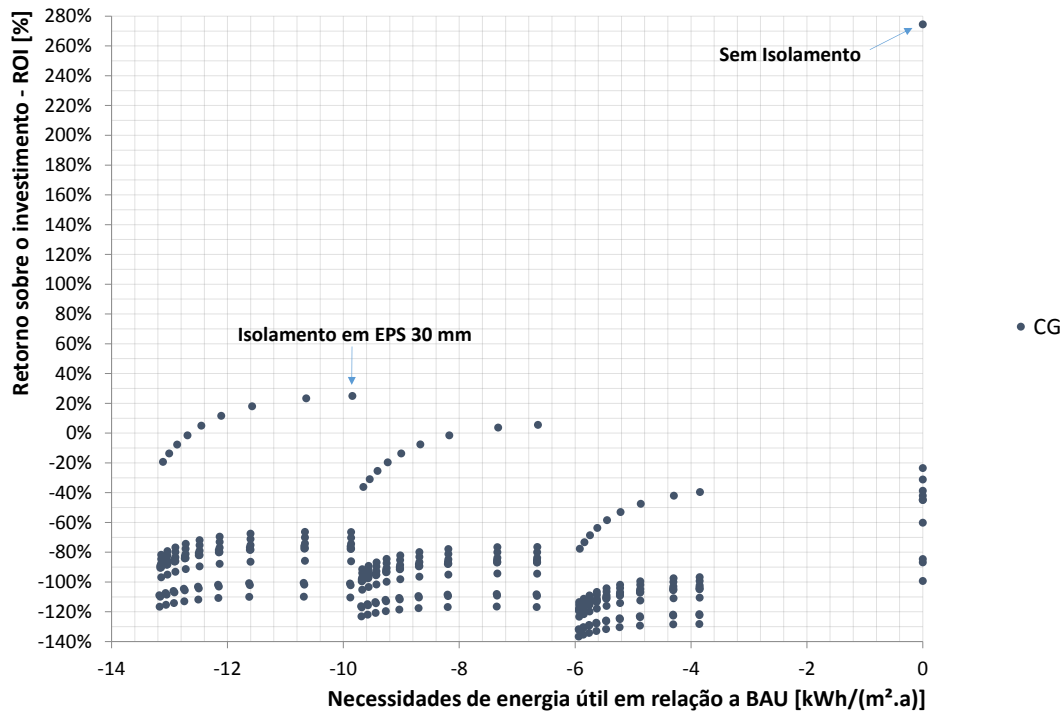


Figura 3.26. Influência das janelas e do isolamento nas necessidades de energia útil para aquecimento e no retorno sobre o investimento para CG.

Tendo sido demonstrada a dominância do sistema de aquecimento sobre as opções de isolamento, no que se refere aos quesitos de rentabilidade, o presente método considera que é possível estabelecer uma equação onde a soma das opções mais rentáveis de isolamento de cobertura, paredes exteriores e pavimento, dado um determinado sistema de aquecimento da área habitável e de águas quentes sanitárias (CO_{IS}), com as melhores opções de janelas (CO_W) e de sistemas baseados em fontes de energia renováveis (CO_R), pode representar o pacote de rentabilidade ótima (CO_G), para o ciclo económico considerado:

$$CO_G = (CO_{IS} + CO_W + CO_R) \quad (38)$$

Isto implica que a AES determine em qual sistema de aquecimento da área habitável deverá ser realizado o investimento, $I_{h,i,k}$, antes de determinar o investimento em isolamento, $I_{ins,i}$, que por sua vez é igual a $I_{insroof,i} + I_{inswalls,i} + I_{insfloor,i}$ (ver Equação 27). A seguir, é demonstrado um procedimento expedito para indicação de rentabilidade de sistemas.

3.7.1 Indicação de rentabilidade de sistemas

No caso do investimento em sistemas de aquecimento da área habitável e para preparação de AQS, I_{sys} (ver Equação 28), pode-se realizar cálculos preliminares que indiquem a rentabilidade dos sistemas com precisão aceitável, através de um procedimento expedito. Estes cálculos são baseados nas necessidades de energia útil, um eixo $[z]$ adicional aos já utilizados na metodologia recomendada pela CE: necessidades de energia primária $[x]$ e custo global $[y]$.

Frequentemente, a dificuldade de seleção dos sistemas é atribuída também à necessidade de cálculos específicos para cada edifício de referência. No entanto, a complexidade da avaliação da rentabilidade de sistemas pode ser reduzida a poucas variáveis que permitem um cálculo independente de detalhes do edifício de referência, sendo elas: custos de energia, de investimento inicial em sistemas, fatores de conversão de energia primária, eficiência dos equipamentos e necessidades de energia útil para aquecimento e preparação de AQS.

A primeira premissa deste cálculo expedito é que as necessidades de energia útil para preparação de AQS podem ser fixadas como constantes, uma vez que não dependem da configuração da envolvente do edifício. Por outro lado, esta variável deve ser mantida nos cálculos porque os requisitos mínimos para desempenho energético a consideram. De salientar que o cálculo exigido pela regulamentação portuguesa [16] indica necessidades nominais de energia útil para preparação de AQS bastante próximas do consumo real, em âmbito nacional [17].

Tendo em vista que o vetor das **necessidades de energia primária** serve para avaliar o impacto ambiental de medidas, deve-se estimar o desempenho dos sistemas nesta função objetivo. Para este efeito, estabelecem-se as funções que caracterizam cada sistema (ou combinação de sistemas) no plano $[x]$, $[z]$ (necessidades de energia primária, necessidades de energia útil), com base nas premissas expressas na Tabela 3.10:

Tabela 3.10. Características de sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados.

h,k	<i>Sistema de Aquecimento</i>			w,k	<i>Sistema de preparação de AQS</i>		
	Equipamento	$P_{h,k}$	$\eta_{h,k}$		Equipamento	$P_{w,k}$	$\eta_{w,k}$
$h,1$	Emissor Elétrico	2,5	1,00	$w,1$	Esquentador a Gás	1,0	0,60
$h,2$	Ar Condicionado	2,5	4,30	$w,2$	Esquentador a Gás	1,0	0,78
$h,3$	Caldeira a Gás	1,0	0,93	$w,3$	Caldeira a Gás	1,0	0,83
$h,4$	Caldeira a Biomassa	1,0	0,92	$w,4$	Caldeira a Biomassa	1,0	0,92

Nota: h,k identifica cada sistema de aquecimento e w,k identifica cada sistema de preparação de AQS, onde $h,1$ combina somente com $w,1$ e assim por diante.

Por exemplo, para cálculo de AC+EG concorrendo com CG a desempenhar as funções de aquecimento da área habitável e preparação de AQS, devemos identificar o ponto onde ambos os sistemas apresentam as mesmas necessidades de energia útil e primária. Ou seja, a partir deste ponto, com o aumento das necessidades de energia útil, uma opção prevalecerá sobre a outra, uma vez que as funções que caracterizam cada sistema (ou combinação de sistemas) são diferentes. Assim, o ponto de interceção das funções será dado por uma equação idêntica à seguinte:

$$\left[\frac{f_{h,2} E_{h,2}}{\eta_{h,2}} P_{h,2} \right] + \left[\frac{f_{w,2} E_{w,2}}{\eta_{w,2}} P_{w,2} \right] = \left[\frac{f_{h,3} E_{h,3}}{\eta_{h,3}} P_{h,3} \right] + \left[\frac{f_{w,3} E_{w,3}}{\eta_{w,3}} P_{w,3} \right] \quad [\text{kWh/a}] \quad (39)$$

Aplicando-se os valores da Tabela 3.10:

$$\left[\frac{1}{4,30} E_{h,2} \ 2,5 \right] + \left[\frac{1}{0,78} E_{w,2} \ 1 \right] = \left[\frac{1}{0,93} E_{h,3} \ 1 \right] + \left[\frac{1}{0,83} E_{w,3} \ 1 \right] \quad [\text{kWh/a}] \quad (40)$$

$$0,5814 E_{h,2} + 1,2820 E_{w,2} = 1,0787 E_{h,3} + 1,2048 E_{w,3}$$

Os coeficientes lineares para AC, EG, CG e CG (AQS) são 0,5814, 1,2820, 1,0787 e 1,2048, respetivamente. Aplicando-se a premissa de que as necessidades de energia útil para preparação de AQS podem ser fixadas como constantes em função do número de ocupantes, consideremos um cenário hipotético em que uma habitação é ocupada por uma família de três pessoas e é utilizado um volume total de 120 litros por dia (40 litros por pessoa). Para estes parâmetros, as necessidades para preparação de AQS são $E_{w,k} = 1783$ [kWh/a]. Considerando-se uma análise anual pode assumir-se que a primeira parte das necessidades de energia útil é para produção de AQS. Sendo assim, neste exemplo, a partir de $x = 1783$ [kWh/a], a energia será utilizada para consumo em aquecimento da área habitável.

Estabelecendo-se uma constante C , a qual ajusta e reposiciona a reta da função de aquecimento, garantindo que passa no ponto $x = 1783$; $y = 1,2820 x$, para a combinação de sistemas AC+EG, temos:

$$0,5814 E_{h,2} + C = 1,2820 E_{w,2}$$

$$C = (1,2820 \cdot 1783) - (0,5814 \cdot 1783) \quad [\text{kWh/a}] \quad (41)$$

$$C = 1249,2 \therefore \text{para AC + EG, } y = 0,5814 x + 1249,2$$

De maneira análoga, obtemos para CG a equação linear $y = 1,0787 x + 224,8$. Igualando-se as duas equações lineares, passa a ser possível estimar as coordenadas onde as necessidades de energia útil e as necessidades de energia primária são iguais para ambos os sistemas:

$$0,5814 x + 1249,2 = 1,0787 x + 224,8 \quad [\text{kWh/a}] \quad (42)$$

$$\therefore x = 2060$$

Isto significa que o ponto de cruzamento entre as retas de AC+EG e CG se dá quando as necessidades de energia útil $[z]$ são iguais a 2060 [kWh/a] ($[E_{h,k} = 277] + [E_{w,k} = 1783]$) e as necessidades de energia primária $[x]$ são iguais a 2447 [kWh/a], conforme pode ser visualizado na Figura 3.27. Ou seja, a partir deste ponto e conforme as necessidades de energia útil aumentam, AC+EG passa a apresentar menor impacto energético que CG, pelo critério de necessidades de energia primária. Neste gráfico, é possível observar que, para o cenário de simulação, onde as necessidades de energia útil para aquecimento da área habitável e preparação de AQS são iguais a 4538 [kWh/a], AC+EG apresentará menores necessidades de energia primária ou menor impacto ambiental, segundo este critério. Nota-se também que CB é sempre melhor que CG, do ponto de vista da energia primária e para necessidades de energia

útil na gama de consumo de edifícios residenciais. EE+EG será sempre a pior opção. Comparando-se AC+EG e EE+EG, conclui-se que a maior eficiência do EG que combina com AC (EG, $\eta_{w,k} = 0,78$) é determinante para o seu melhor desempenho, nesta análise.

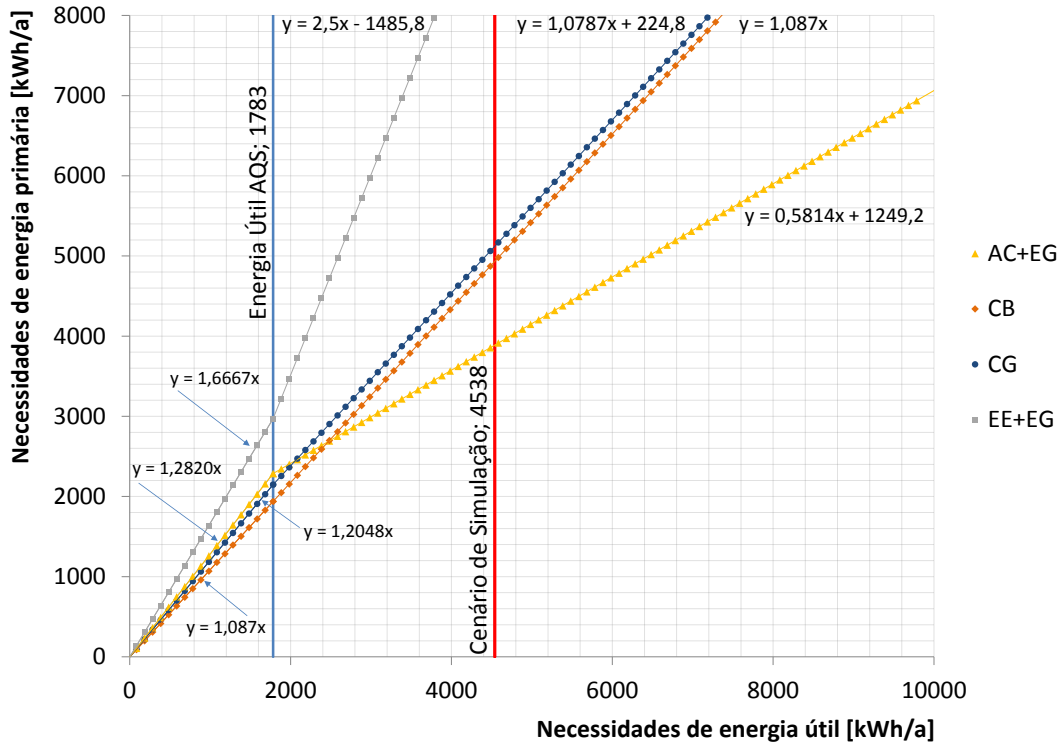


Figura 3.27. Desempenho de sistemas em termos de necessidades de energia primária em função das necessidades de energia útil para aquecimento e AQS.

De maneira análoga, pode-se estimar o desempenho económico de sistemas na função objetivo do **custo global** na perspetiva financeira, com acréscimo da variável custo de investimento em sistemas, I_{sys} , composto pelo somatório de investimento em sistemas de aquecimento da área habitável, $I_{h,k}$, e em sistema de preparação de AQS, $I_{w,k}$ (ver Equação 28).

No caso de um sistema para produção de AQS que somente desempenha esta função, o investimento $I_{w,k}$ que representa a rentabilidade ótima seria mais facilmente obtido, porque a determinação da atratividade do investimento se resume ao menor custo possível, em euros por quilowatt-hora [€/kWh] de energia útil produzida para este fim. No entanto, a análise não deve restringir-se a esta situação particular, pois é comum encontrarmos no mercado equipamentos que desempenham múltiplas funções, a preços competitivos. Portanto, mesmo um procedimento expedito deve contemplar a combinação de aquecimento da área habitável e preparação de AQS.

Assim sendo, para a estimativa de custo global de sistemas, estabelecem-se as retas que caracterizam cada sistema (ou combinação de sistemas) no plano [y], [z] (custo global, necessidade de energia útil). As premissas de custo de investimento estão expressas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11. Custo de investimento para sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados.

h,k	<i>Sistema de Aquecimento</i>			w,k	<i>Sistema de preparação de AQS</i>		
	Equipamento	$I_{h,k}$ [€]	[€/kWh]		Equipamento	$I_{w,k}$ [€]	[€/kWh]
$h,1$	Emissor Elétrico	908,18	0,2390	$w,1$	Esquentador a Gás	324,93	0,1032
$h,2$	Ar Condicionado	4948,01	0,2390	$w,2$	Esquentador a Gás	541,54	0,1032
$h,3$	Caldeira a Gás	1520,10	0,1032	$w,3$	Caldeira a Gás	971,87	0,1032
$h,4$	Caldeira a Biomassa	4775,96	0,0492	$w,4$	Caldeira a Biomassa	3053,48	0,0492

Nota: Valores com impostos e taxas; custo de investimento de CB e CG para preparação de AQS obtido com o rácio da sua participação de 39% no total de necessidades de energia útil do cenário de referência (1783 sobre 4538 [kWh/a]).

Destaca-se que este custo global considera apenas o custo de investimento em sistemas (desconsidera, por exemplo, os custos com isolamento, janelas, sistemas baseados em FER etc.). Além do custo de investimento e manutenção dos sistemas, são considerados os custos totais com energia.

Para facilitar os cálculos, podemos utilizar o ciclo de vida que todos os sistemas em estudo compartilham, 20 anos. Assim, evita-se trabalhar com custos de substituição ou valores residuais. Isto é possível porque não estamos, neste momento, interessados em custos globais exatos, mas sim na configuração das retas para cada sistema e nos cruzamentos entre elas. Da mesma forma em que ocorreu no estudo da energia primária, a partir do ponto de cruzamento de retas e conforme as necessidades de energia útil aumentam, uma opção prevalecerá sobre a outra, uma vez que as funções que caracterizam cada sistema (ou combinação de sistemas) são diferentes. Para os cálculos do custo global considera-se uma determinada taxa de desconto que, neste caso, é de 6%.

Para facilitar a compreensão do procedimento para estimativa do custo global, vamos inicialmente analisar o custo global associado a um sistema de preparação de AQS. Por exemplo, para cálculo do custo global de um EG, $GC_{w,2}$, temos:

$$GC_{w,2}(x) = I_{w,2} + \left[\sum_{i=0}^{20} M_{w,2} + EC_{w,2} \right] D_i \quad [€] \quad (43)$$

Os custos de energia para preparação de AQS, $EC_{w,2}$, resultam da energia final, $FE_{w,2}$, respetivamente, multiplicada pelo custo de sua fonte de energia, $C_{gas,i}$ (correspondente a gás) e, obviamente, depende das necessidades de energia útil para preparação de AQS, $E_{w,2}$, conforme já demonstrado anteriormente na explanação geral sobre o método (ver Equações 31 e 33). Aplicando-se os valores da Tabela 3.11 e realizando-se os cálculos com VAL para 20 anos de funcionamento do EG, temos:

$$GC_{w,2}(x) = 1,8952 E_{w,2} + 603,7 \quad [€] \quad (44)$$

Assim, o coeficiente linear para EG é 1,8952 e a constante que representa a soma do investimento inicial e o VAL dos custos associados de energia e manutenção é 603,7. Aplicando-se mais uma vez a premissa de que as necessidades de energia útil para preparação de AQS são constantes, considera-se $E_{w,k} = 1783$ [kWh/a], sendo a reta característica para esta condição apresentada na Figura 3.28. Apresentam-se nesta mesma figura todas as outras funções associadas aos vários sistemas.

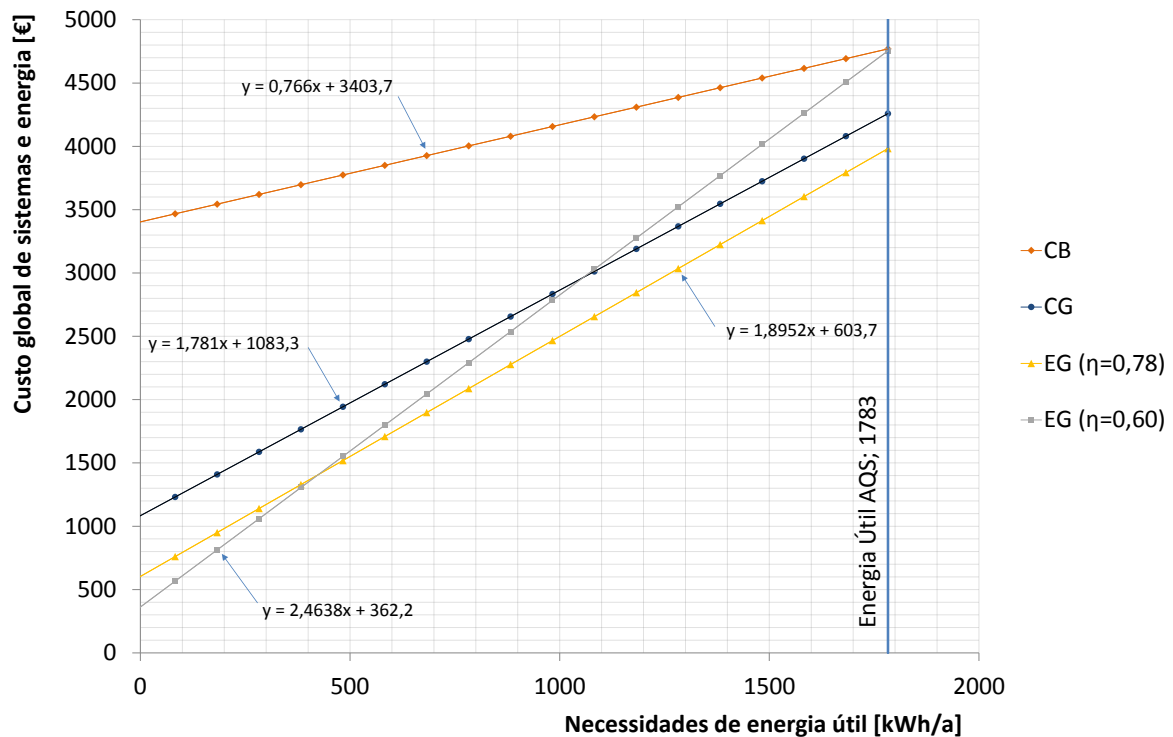


Figura 3.28. Indicação de custo global de sistemas e energia em função das necessidades de energia útil para AQS, pelo procedimento expedito.

De seguida, vamos analisar o custo global associado às necessidades de energia útil que serão suportadas por um sistema aquecimento. Por exemplo, para cálculo do custo global de um AC, $GC_{h,2}$, temos:

$$GC_{h,2}(x) = I_{h,2} + \left[\sum_{i=0}^{20} M_{h,2} + EC_{h,2} \right] D_i \quad [€] \quad (45)$$

Da mesma forma, os custos de energia para aquecimento, $EC_{h,2}$, resultam da energia final, $FE_{h,2}$, multiplicada pelo custo de sua fonte de energia, $C_{elet,i}$ (correspondente a eletricidade) e, obviamente, depende das necessidades de energia útil para aquecimento, $E_{h,2}$, conforme já demonstrado anteriormente na explanação geral sobre o método (ver Equações 30 e 32).

Aplicando-se os valores da Tabela 3.11 e realizando-se os cálculos com VAL para 20 anos de funcionamento do AC, temos:

$$GC_{h,2}(x) = 0,7959 E_{h,2} + 5515,5 \quad [€] \quad (46)$$

Assim, o coeficiente linear para AC é 0,7959 e a constante que representa a soma do investimento inicial e o VAL dos custos associados de energia e manutenção é 5515,5. Aplicando-se um cenário hipotético em que as necessidades de energia útil para aquecimento são estimadas em $E_{w,k} = 2755$ [kWh/a], apresenta-se a reta característica para esta condição na Figura 3.29. Apresentam-se nesta mesma figura todas as outras funções associadas aos vários sistemas.

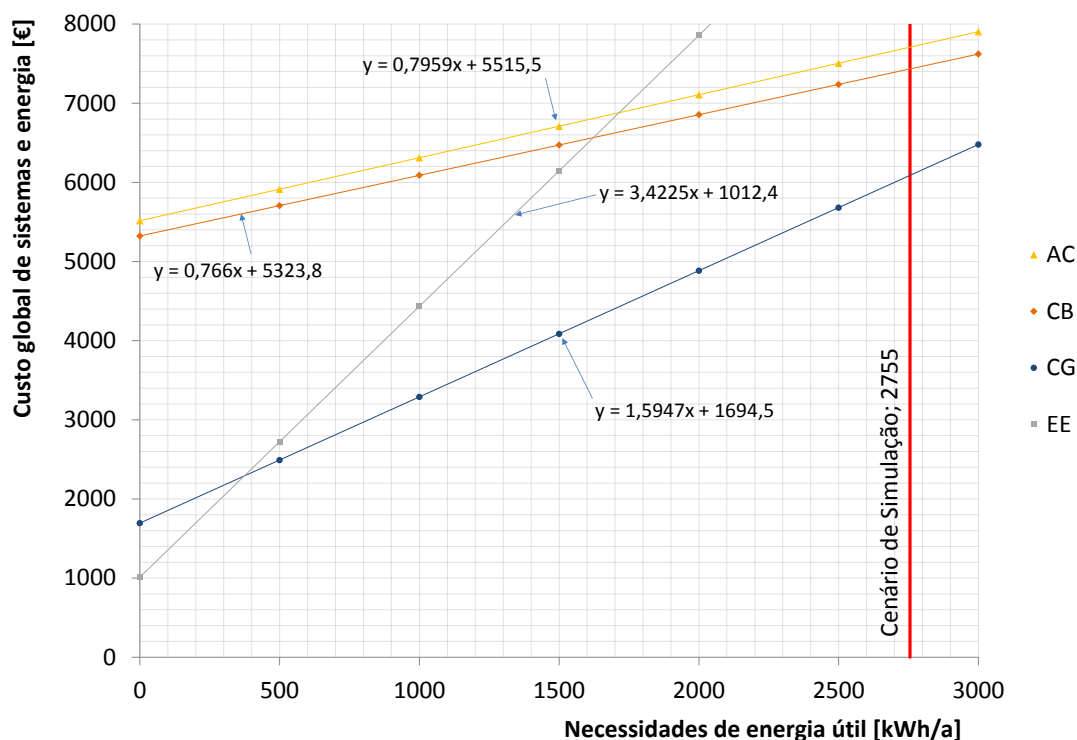


Figura 3.29. Indicação de custo global de sistemas e energia em função das necessidades de energia útil para aquecimento, pelo procedimento expedito.

No entanto, esta análise deve contemplar a combinação de aquecimento da área habitável e preparação de AQS. Por exemplo, para cálculo do custo global de AC+EG, $GC_{2,2}$, temos:

$$GC_{2,2}(x) = GC_{h,2} + GC_{w,2} \quad [€] \quad (47)$$

$$GC_{2,2}(x) = (0,7959 E_{h,2} + 5515,5) + (1,8952 E_{w,2} + 603,7)$$

Considera-se que os custos de investimento inicial e os custos de manutenção destes sistemas não dependem das necessidades de energia útil, uma vez que irão ocorrer mesmo que os sistemas não sejam utilizados. Assim, pode-se assumir que a soma das constantes ($5515,5 + 603,7 = 6119,2$) representa o VAL destes custos para a combinação AC+EG.

Aplicando-se a premissa de que as necessidades de energia útil para preparação de AQS são constantes, considere-se $E_{w,2} = 1783$ [kWh/a]. A exemplo do que ocorreu no estudo da energia primária, numa análise anual pode assumir-se que a primeira parte das necessidades de energia útil é para produção de AQS. Sendo assim, a partir de $x = 1783$ [kWh/a], a energia será utilizada para consumo em aquecimento da área habitável.

Para ilustrar graficamente a combinação de sistemas AC+EG, estabelece-se a nova constante, C , que ajusta e reposiciona a reta da função de aquecimento, garantindo que passa no ponto $x = 1783$; $y = 1,8952 x + 6119,2$, para a combinação de sistemas AC+EG, temos:

$$(0,7959E_{h,2} + C - 5515,5) = (1,8952 E_{w,2} + 603,7)$$

$$C = (1,8952 \cdot 1783) - (0,7959 \cdot 1783) + 6119,2 \quad [\text{€}] \quad (48)$$

$$C = 8079,2 \therefore \text{para AC + EG, } y = 0,7959 x + 8079,2$$

As retas que representam a combinação de sistemas AC+EG são demonstradas na Figura 3.30, onde a reta da função AQS passa a ser representada por $y = 1,8952 x + 6119,2$, para que os custos de investimento inicial e os custos de manutenção de ambos os sistemas fique representado já no início do período.

Para a comparação entre duas soluções que suportem as necessidades de energia para aquecimento da área habitável e produção de AQS, podemos identificar o ponto onde ambas as opções apresentam as mesmas necessidades de energia útil e o mesmo custo global.

Por exemplo, para cálculo do custo global de AC+EG, $GC_{2,2}$, concorrendo com CG a desempenhar as funções de aquecimento e preparação de AQS, $GC_{3,3}$, temos $GC_{2,2}(x) = GC_{3,3}(x)$, onde cada uma das opções é calculada por:

$$GC_{h,w}(x) = (I_h + I_w) + \left[\sum_{i=0}^{20} (M_{h,i} + M_{w,i}) + (EC_{h,i} + EC_{w,i}) \right] D_i \quad [\text{€}] \quad (49)$$

Conforme pode-se observar nas Figuras 3.28 e 3.29, os coeficientes lineares para CG e CG (AQS) são 1,5947 e 1,781, respetivamente. As constantes para CG e CG (AQS) são 1694,5 e 1083,3, respetivamente. Aplicando-se mais uma vez a premissa de que as necessidades de energia útil para preparação de AQS são fixadas como constantes, considere-se $E_{w,3} = 1783$ [kWh/a]. Estabelecendo-se uma constante C para a CG para reposicionar a reta, temos:

$$(1,5947E_{h,2} + C - 1694,5) = (1,781 E_{w,2} + 1083,3)$$

$$C = (1,781 \cdot 1783) - (1,5947 \cdot 1783) + 2777,8 \quad [\text{kWh/a}] \quad (50)$$

$$C = 3110 \therefore \text{para AC + EG, } y = 1,5947 x + 3110$$

Igualando-se as duas equações, determina-se as coordenadas onde as necessidades de energia útil e os custos globais são iguais para ambos os sistemas:

$$0,7959 x + 8079,2 = 1,5947 x + 3110$$

$$\therefore x = 6221$$

[kWh/a] (51)

Isto significa que o ponto de cruzamento entre as retas de AC+EG e CG se dá no momento em que as necessidades de energia útil (eixo horizontal [z]) são iguais a 6221 [kWh/a] ($[E_{h,k} = 4438] + [E_{w,k} = 1783]$) e o custo global de sistemas (eixo vertical [y]) são iguais a 13030 [kWh/a] (para AC+EG, $[GC_{h,2} = 3532] + [GC_{w,2} = 9498]$; CG, $[GC_{h,3} = 7077] + [GC_{w,3} = 5953]$), conforme pode ser visualizado na Figura 3.30.

Ou seja, a partir deste ponto e conforme as necessidades de energia útil aumentam, AC+EG passa a apresentar menor custo global que CG.

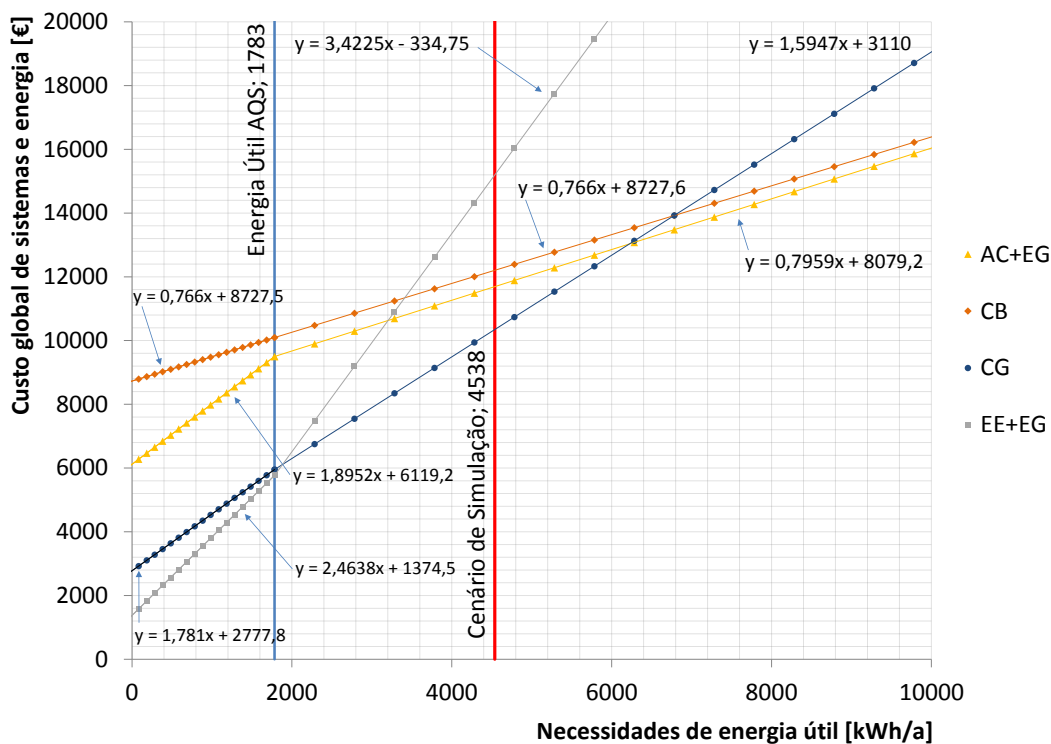


Figura 3.30. Indicação de custo global de sistemas e energia em função das necessidades de energia útil para aquecimento e AQS, pelo procedimento expedito.

Para se perceber como se estabelecer matematicamente o ponto onde ambas as opções apresentam as mesmas necessidades de energia útil e o mesmo custo global, considere-se, a título de exemplo, a avaliação do custo global de AC+EG a concorrer com CG. Assume-se então que $GC_{2,2}(x) = GC_{3,3}(x)$, onde $E_{h,2} = E_{h,3} = E_{h,k}$ e $E_{w,2} = E_{w,3} = 1783$ [kWh/a], sendo que as retas se intercetarão em:

$$\begin{aligned}
& (0,7959 E_{h,2} + 5515,5) + (1,8952 E_{w,2} + 603,7) \\
& = (1,5947 E_{h,3} + 1694,5) + (1,781 E_{w,3} + 1083,3) \\
& 1,5947 E_{h,k} - 0,7959 E_{h,k} \quad \quad \quad [€] \quad (52) \\
& = (1,8952 \cdot 1783) - (1,781 \cdot 1783) + 3341,4 \\
& 0,7988 E_{h,k} = 3545 \therefore E_{h,k} = 4438
\end{aligned}$$

Somando este valor de 4438 às necessidades de energia útil para preparação de AQS, obtém-se o mesmo valor alcançado anteriormente, 6221 [kWh/a] ($[E_{h,k} = 4438] + [E_{w,k} = 1783]$) e o custo global de sistemas (eixo vertical [y]) é igual a 13030 [€], conforme pode ser visualizado na Figura 3.30. Nesta figura também é possível observar que existem soluções que não se intercetam na gama de necessidades de energia útil estudada. Portanto, é sempre recomendável a análise gráfica para se visualizar com maior clareza a configuração das retas características dos vários sistemas.

Um outro ponto importante é a relevância das eficiência dos sistemas que se combinam para atender às necessidades de aquecimento e de preparação de AQS. Comparando-se AC+EG e EE+EG, conclui-se que a maior eficiência do EG que combina com AC ($EG, \eta_{w,k} = 0,78$) também é determinante para o seu melhor desempenho na análise de custo global.

Supondo a combinação de AC com o mesmo equipamento que combina com EE ($EG, \eta_{w,k} = 0,60$), o resultado mudaria significativamente, mesmo levando-se em conta o menor preço deste equipamento ($EG, I_{w,1} = 324,93$ [€]). Neste cenário, AC+EE passaria a ser também pior opção que CB, conforme pode ser observado na Figura 3.31.

No caso do investimento em sistemas baseados em FER, I_{res} , as opções que representam a rentabilidade ótima são facilmente obtidas porque a determinação da atratividade do investimento se resume ao menor custo possível em euros por quilowatt-hora [€/kWh] de energia útil produzida.

Este custo de energia útil produzida deve ser ainda inferior ao custo de produção do sistema convencional. Caso isto não ocorra, o investimento em FER será desaconselhável, do ponto de vista estritamente financeiro.

No entanto, mesmo que o custo de energia útil produzida seja superior ao custo de produção do sistema convencional, a inserção de soluções baseadas em FER em pacotes de medidas pode viabilizar investimentos em outras opções que são rentáveis, mas que podem não atender os requisitos mínimos regulamentares.

Assim, os sistemas FER também servem para reduzir as necessidades de energia primária e viabilizar outros investimentos.

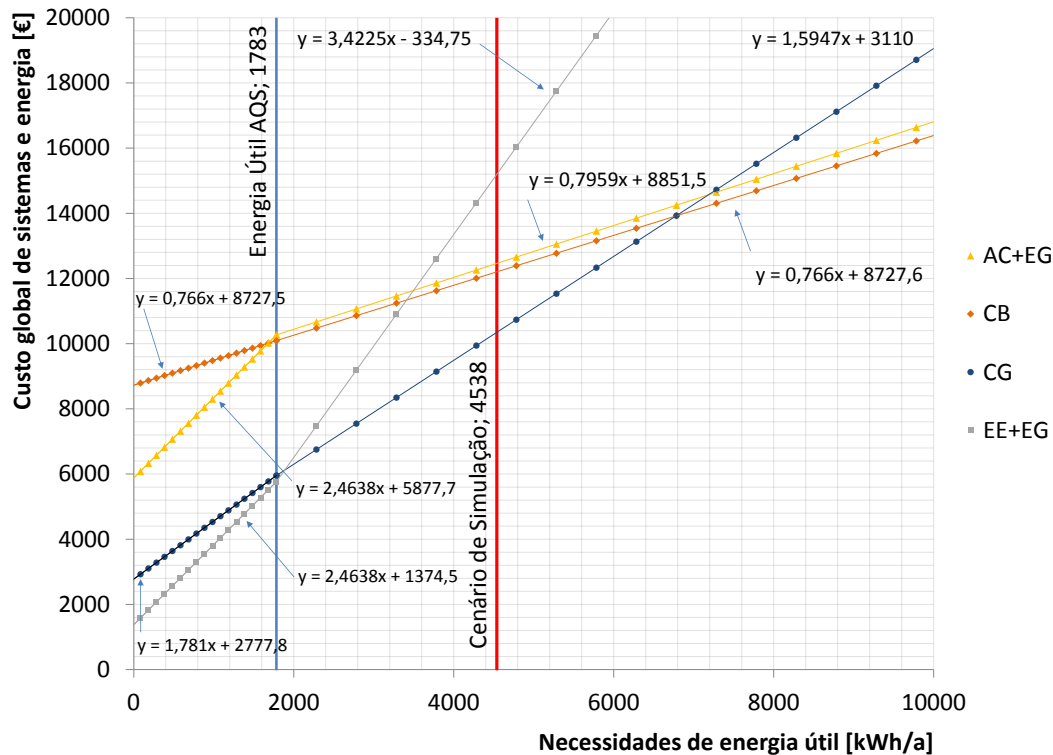


Figura 3.31. Indicação de custo global associado a sistemas e energia em função das necessidades de energia útil para aquecimento e AQS, pelo procedimento expedito (cenário em que AC combina com EG, $\eta_{w,k} = 0,60$).

Obviamente, o procedimento expedito aqui apresentado serve para selecionar as soluções que serão consideradas nas simulações de rentabilidade e também para apontar os pacotes de rentabilidade ótima mais prováveis, facilitando assim a conferência da correção dos cálculos.

Finalmente, deve-se reiterar que as soluções de rentabilidade ótima devem cumprir requisitos mínimos de desempenho energético de edifícios, estabelecidos em âmbito nacional.

Sendo assim, as simulações de rentabilidades de medidas (SRM) são essenciais para apontar as soluções aceitáveis, de acordo com a regulamentação em vigor.

3.8 Sistema de Eficiência Energética em Edifícios (\$e³)

O Sistema de Eficiência Energética em Edifícios (\$e³) é um programa concebido em Microsoft Excel® e com recurso a macros de Visual Basic 6.0 para implementação do método de seleção de soluções e avaliação da rentabilidade de medidas de eficiência energética.

A ferramenta permite o cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade cumprindo os requisitos do quadro metodológico do Regulamento Delegado n.º 244/2012 [10].

É composto por 12 módulos de entrada de dados e cálculo:

1. *Referência* – contém as informações básicas e todas as características do edifício de referência necessárias ao cálculo;
2. *Energia* – apresenta custos de energia (ERSE) e de emissões de carbono, além da estimativa de evolução destes custos com horizonte de 50 anos (Eurostat);
3. *Custos* – contém os custos de investimento inicial de medidas, coletados junto ao mercado de especialidade;
4. *AES – Isolamentos* – análise económica de soluções (AES) das principais opções de isolamento disponíveis no mercado, em [€/r];
5. *AES – Envidraçados* – análise económica de opções de janelas, em [€/r];
6. *AES – Sistemas* – análise económica das principais opções de sistemas disponíveis no mercado, inclusive dos baseados em fontes de energia renováveis (FER), em [€/kWh];
7. *dFER* – configuração ótima de sistemas de energias renováveis (FER) disponíveis no mercado, conforme zona climática do edifício de referência;
8. *Indicação de Sistemas* – pré-análise do custo global e das necessidades de energia primária para sistemas de aquecimento da área habitável e preparação de AQS nos vetores dos estudos de rentabilidade, em função das necessidades de energia útil;
9. *Plano de simulação* – contém o planeamento dos parâmetros para simulação de desempenho energético (SDE) e também para a simulação de rentabilidade de medidas (SRM), bem como define o espaço de busca (total de combinações) para a geração da curva de rentabilidade;
10. *SDE* – simulação de desempenho energético do edifício, obtendo as necessidades de energia útil para aquecimento e preparação de AQS (para cada pacote de medidas), calculadas conforme EN ISO 13790:2008 [69], as quais constituem dados de entrada para os cálculos de rentabilidade;
11. *SRM* – reflete a simulação de rentabilidade de um pacote de medidas de eficiência energética para o edifício de referência e apresenta o cálculo do impacto destas medidas, através do uso de critérios de avaliação do investimento;
12. *ASP* – gráficos de análise de sensibilidade dos principais parâmetros utilizados nos cálculos de rentabilidade.

Para a composição de um cenário de reabilitação energética são necessárias várias informações do edifício de referência. O módulo *Referência* (1) contém as informações básicas e todas as características necessárias ao cálculo. Algumas delas, são ilustradas na Figura 3.32.

Os custos de energia (de acordo com estimativa de evolução de preços) e de emissões de gases com efeito estufa (GEE) vêm do módulo *Energia* (2), como no exemplo da Figura 3.33.

Edifício de Referência								
Categoria:	Residencial Unifamiliar	Época:	<1960	Localização:	AMARANTE	Altitude [m]:	320	
Tipologia:	T 2	GD [°C-dia]:	1 570	T.Ext. Verão [°C]	21,40			
Áreas [m²] =>	Cobertura:	80,00	Paredes:	84,56	Envidraçados:	12,00	Útil:	80,00
Perspetiva Macroeconómica								
Taxa de Desconto:	3%	Custo Global ₂₅ :	14 204	Custo Global ₃₀ :	16 254	Custo Global ₅₀ :	23 135	
Investimentos [€]					Custos [€]			
Isolamento	Envidraçados	Sistemas	Renováveis	Soma	Energia	Manutenção	Carbono	Soma
-	575	643	-	1 218	11 344	296	1 345	12 986
0,00%	4,05%	4,53%	0,00%	8,58%	79,87%	2,09%	9,47%	91,42%
-	628	796	-	1 424	12 753	334	1 743	14 830
0,00%	3,86%	4,90%	0,00%	8,76%	78,46%	2,05%	10,73%	91,24%
-	795	1 751	-	2 545	16 816	438	3 336	20 590
0,00%	3,44%	7,57%	0,00%	11,00%	72,69%	1,89%	14,42%	89,00%

Figura 3.32. Extrato do módulo *Referência* do \$e³.

Preços de Energia [€/kWh] - Cenários de Reabilitação							
Eletricidade		Gás natural		Pellets		Eurostat	
FIN	MAC	FIN	MAC	FIN	MAC	Taxa	
0,2390	0,1166	0,1032	0,0839	0,0492	0,0400		2015
0,25	0,12	0,11	0,09	0,05	0,04		2016
0,26	0,12	0,11	0,09	0,05	0,04	3,49%	2017
0,26	0,13	0,11	0,09	0,05	0,04		2018
0,27	0,13	0,12	0,10	0,06	0,05		2019
0,27	0,13	0,12	0,10	0,06	0,05		2020
0,27	0,13	0,12	0,10	0,06	0,05		2021
0,27	0,13	0,12	0,10	0,06	0,05	0,00%	2022
0,27	0,13	0,12	0,10	0,06	0,05		2023
0,27	0,13	0,12	0,10	0,06	0,05		2024

Figura 3.33. Extrato do módulo *Energia* do \$e³.

Os custos de investimento inicial vêm do módulo *Custos* (3), conforme Figura 3.34.

Sistemas	[un]	[€/un]	Manutenção	1.002,53	10,03	4.463,05	44,63
Irradiador a óleo	3	50,00	0,50				
Unidade compacta 10 kW	3	300,00	3,00				
Ar-Ar Multi split External 10 kW	1	2.790,40	27,90			2.790,40	27,90
Ar-Ar Multi split Internal 2 kW	3	410,79	4,11			1.232,37	12,32
Bomba de calor	1	8.516,17	85,16				
Radiadores	3	130,75	1,31				
Caldeira a gás	1	1.633,74	16,34				
Emissor elétrico	3	246,12	2,46	738,36	7,38		
Esquentador elétrico	1	439,12	4,39				
Esquentador antigo	1	264,17	2,64	264,17	2,64		
Esquentador a gás	1	440,28	4,40			440,28	4,40
Renováveis	[un]	[€/un]	Manutenção	0,00	0,00	1.617,00	16,17
Sistema a Biomassa	1	6.365,40	63,65				
Sistema Solar Térmico	1	1.617,00	16,17			1.617,00	16,17
Sistema Fotovoltaico	1	10.451,39	104,51				

Figura 3.34. Extrato do módulo *Custos* do \$e³.

A seleção de materiais de isolamento para as simulações é realizada no módulo *AES – Isolamentos* (4), conforme Figura 3.35.

PUR					
Condutibilidade	Densidade [kg/m ³]	Espessura [mm]	Preço [€/m ²]	Resistência	€/r
0,023	40	40	29,24	1,739	16,813
		60	33,86	2,609	12,980
		80	38,48	3,478	11,063
		100	43,1	4,348	9,913
		120	47,72	5,217	9,146
		140	52,34	6,087	8,599
		160	56,96	6,957	8,188
XPS					
Condutibilidade	Densidade [kg/m ³]	Espessura [mm]	Preço [€/m ²]	Resistência	€/r
0,035	30-33	40	24,50	1,143	21,438
		60	27,00	1,714	15,750
		80	29,50	2,286	12,906
		100	32,00	2,857	11,200
		120	34,50	3,429	10,063
		140	37,00	4,000	9,250
		160	39,50	4,571	8,641

Figura 3.35. Extrato do módulo *AES – Isolamentos* do \$e³.

A análise económica de opções de janelas é realizada no módulo *AES – Envidraçados* (5), conforme Figura 3.36.

Descrição	Sistema	Dimensões (AxL) [m]	Área [m ²]	Vidro [mm]	Fator solar	U [W/m ² .°C]	r [m ² .°C/W]	Preço [€]	€/r	€/m ²
Madeira Antiga	Madeira	1,40x1,30	1,82	Simplex	0,85	5,100	0,196	100,00	510,00	54,95
Abrir 1 folha	PVC	1,40x1,30	1,82	Duplo	0,58	1,870	0,535	359,07	671,46	197,29
Oscilobatente de 1 folha	PVC	1,40x1,30	1,82	Duplo	0,47	1,800	0,556	381,20	686,16	209,45
Abrir 1 folha	PVC	1,40x1,30	1,82	Duplo	0,59	2,080	0,481	341,50	710,32	187,64
Abrir 2 folhas	PVC	1,40x1,30	1,82	Triplo	0,36	1,210	0,826	602,00	728,42	330,77
Correr 1 folha	PVC	1,40x1,30	1,82	Duplo	0,59	2,370	0,422	434,80	1 030,48	238,90
Correr 1 folha	PVC	1,40x1,30	1,82	Duplo	0,30	2,070	0,483	515,10	1 066,26	283,02
Correr 2 folhas	PVC	1,40x1,30	1,82	Duplo	0,47	2,070	0,483	535,30	1 108,07	294,12
Oscilobatente de 2 folhas	PVC	1,40x1,30	1,82	Triplo	0,36	1,210	0,826	718,60	869,51	394,84

Figura 3.36. Extrato do módulo *AES – Envidraçados* do \$e³.

Para se realizar a análise económica de sistemas, as combinações de equipamentos para aquecimento da área habitável, preparação de AQS e FER a serem estudadas são inseridas no módulo *AES – Sistemas* (6), conforme Figura 3.37.

Sistema	Fator de Utilização	Investimento	Vida útil	Custo de Substituição	Valor Residual	Custo de Manutenção	Eficiência		Combustível	
		[€]	[anos]	[€]	[€]	[€.ano]	η_{Nic}	η_{Qa}	Nic	Qa
AC + Esq. Gás Ant.	100%	4.287	20	4.287	2.143	43	4,30	0,60	Eletricidade	Gás natural
Caldeira a gás	100%	2.026	20	2.026	1.013	20	0,93	0,83	Gás natural	Gás natural
Biomassa	100%	6.365	20	6.365	3.183	64	0,92	0,92	Pellets	Pellets
EE + Esq. Gás Ant.	100%	1.003	20	1.003	501	10	1,00	0,60	Eletricidade	Gás natural

Figura 3.37. Extrato do módulo *AES – Sistemas* do \$e³.

Dados relativos ao dimensionamento FER são extraídos do módulo *dFER* (7), o qual apresenta as configurações obtidas com recurso a programas como SolTerm, PVsyst etc., conforme Figura 3.38.

Nº	Sistema	FER	Custo inicial [€]	Eficiência %	Produção anual (kWh/ano)	Parcela p/ aquecimento [kWh.ano]	Parcela p/arrefecimento [kWh.ano]	Parcela p/AQS [kWh.ano]
GD = 1.304	Solar Térmico	Térmica	1617	100	1286	0	0	1286
GD = 987	Solar Térmico	Térmica	1617	100	1408	0	0	1408
GD = 2.015	Solar Térmico	Térmica	1617	100	1233	0	0	1233

Figura 3.38. Extrato do módulo *dFER* do \$e³.

Para se obter uma indicação de quais sistemas têm maior potencial para a gama de necessidades de energia útil em estudo, utiliza-se o módulo *Indicação de Sistemas* (8), cujos gráficos já foram apresentados no item 3.7.1. O módulo *Plano de simulação* (9) apresenta o planeamento das simulações, SDE e SRM, como no exemplo da Figura 3.39.

Envolvente				
Cobertura	Paredes	Pavimento	Isolamento	Envidraçados
Transmissão U [W/m².°C]	Transmissão U [W/m².°C]	Transmissão U [W/m².°C]	Preço [€/r]	Transmissão U [W/m².°C]
2,800	1,740	1,650	-	5,10
0,681	0,593	0,582	22,47	1,53
0,681	0,593	0,582	9,81	
0,494	0,446	0,440	22,47	
0,494	0,446	0,440	9,81	
0,388	0,358	0,354	22,47	
0,388	0,358	0,354	9,81	
0,319	0,298	0,296	22,47	
0,319	0,298	0,296	9,81	
0,271	0,256	0,254	22,47	
0,271	0,256	0,254	9,81	
0,236	0,224	0,222	22,47	
0,236	0,224	0,222	9,81	

Figura 3.39. Extrato do módulo *Plano de simulação* do \$e³.

As necessidades de energia útil são calculadas [69] para os cenários de reabilitação e extraídas via macro para o módulo *SDE* (10), conforme exemplo ilustrado na Figura 3.40.

UCobertura	UParedes	UPavimento	Ujanela	gVidro	Aquecimento	AQS	Renovaveis	Local	Altitude	Graus-Dia	T.Ext.Verão	Nic	Qa
2,800	2,000	1,650	5,100	0,85	Emissor elétrico	Esquentador antigo	0	AMARANTE	320	1570	21,40	34,44	1782,96
2,800	2,000	1,650	5,100	0,85	Ar Condicionado	Esquentador antigo	0	AMARANTE	320	1570	21,40	34,44	1782,96
2,800	2,000	0,582	5,100	0,85	Emissor elétrico	Esquentador antigo	0	AMARANTE	320	1570	21,40	30,14	1782,96
2,800	2,000	0,582	5,100	0,85	Ar Condicionado	Esquentador antigo	0	AMARANTE	320	1570	21,40	30,14	1782,96
2,800	2,000	0,440	5,100	0,85	Emissor elétrico	Esquentador antigo	0	AMARANTE	320	1570	21,40	29,57	1782,96
2,800	2,000	0,440	5,100	0,85	Ar Condicionado	Esquentador antigo	0	AMARANTE	320	1570	21,40	29,57	1782,96
2,800	2,000	0,354	5,100	0,85	Emissor elétrico	Esquentador antigo	0	AMARANTE	320	1570	21,40	29,23	1782,96
2,800	2,000	0,354	5,100	0,85	Ar Condicionado	Esquentador antigo	0	AMARANTE	320	1570	21,40	29,23	1782,96
2,800	2,000	0,296	5,100	0,85	Emissor elétrico	Esquentador antigo	0	AMARANTE	320	1570	21,40	28,99	1782,96
2,800	2,000	0,296	5,100	0,85	Ar Condicionado	Esquentador antigo	0	AMARANTE	320	1570	21,40	28,99	1782,96

Figura 3.40. Extrato do módulo *SDE* do \$e³.

O módulo *SRM* (11) simula a rentabilidade de um pacote de medidas de eficiência energética para o edifício de referência e remete os resultados via macro para a ASP, conforme exemplo ilustrado na Figura 3.41.

Pacote =>	Cobertura	Paredes	Pavimento	Janela	Aquecimento	AQS	Renováveis
U e η =>	2,80	2,00	1,65	5,10	4,30	0,60	
Custo =>	-	-	-	700,00	4 022,77	264,17	-

Perspetiva Financeira							
Taxa de Desconto	6%	Custo Global ₂₅ :	14 033	Custo Global ₃₀ :	15 212	Custo Global ₅₀ :	19 184
PRS [anos]:	9	TIR ₂₅ :	6,36%	TIR ₃₀ :	7,45%	TIR ₅₀ :	8,29%
PRA [anos]:	14	EcoEnergia ₂₅ :	5 917	EcoEnergia ₃₀ :	6 368	EcoEnergia ₅₀ :	7 309

Investimentos					Custos		
Isolamento	Envidraçados	Sistemas	Renováveis	Soma	Energia	Manutenção	Soma
-	786	4 351	-	5 137	8 112	784	8 896
0,00%	5,60%	31,01%	0,00%	36,61%	57,80%	5,59%	63,39%
-	824	4 814	-	5 637	8 730	844	9 574
0,00%	5,41%	31,65%	0,00%	37,06%	57,39%	5,55%	62,94%
-	910	7 287	-	8 196	10 021	967	10 988
0,00%	4,74%	37,98%	0,00%	42,72%	52,24%	5,04%	57,28%
-	861	5 273	-	6 134	-	-	-
-	-	-	-	-	578	61	639
-	-	-	-	-	598	61	659
-	-	-	-	-	619	61	680
-	-	-	-	-	640	61	701
-	-	-	-	-	640	61	701
-	-	-	-	-	640	61	701
-	-	-	-	-	640	61	701
-	-	-	-	-	640	61	701
-	-	-	-	-	640	61	701
-	-	-	-	-	643	61	704
-	-	-	-	-	645	61	707
-	-	-	-	-	648	61	709
-	-	-	-	-	650	61	712
-	-	-	-	-	653	61	714
-	-	-	-	-	653	61	714
-	-	-	-	-	653	61	714
-	-	-	-	-	653	61	714
-	-	-	-	-	653	61	714
-	-	5 273	-	5 273	649	61	711
-	-	-	-	-	645	61	707
-	-	-	-	-	642	61	703
-	-	-	-	-	638	61	699
-	-	-	-	-	634	61	696
-	-	-	-	-	633	61	694
-	-	-	-	-	632	61	693
-	-	-	-	-	631	61	692
-	-	-	-	-	629	61	691
-	-	-	-	-	628	61	689
-	-	-	-	-	630	61	691
-	-	-	-	-	632	61	693
-	-	-	-	-	634	61	695
-	-	-	-	-	636	61	697
-	-	-	-	-	637	61	699
-	-	-	-	-	639	61	701
-	-	-	-	-	641	61	703
-	-	-	-	-	643	61	705
-	-	-	-	-	645	61	706
-	-	-	-	-	647	61	708
-	861	5 273	-	6 134	649	61	710
-	-	-	-	-	651	61	712
-	-	-	-	-	653	61	714
-	-	-	-	-	655	61	716
-	-	-	-	-	657	61	718
-	-	-	-	-	659	61	720
-	-	-	-	-	661	61	722
-	-	-	-	-	663	61	724
-	-	-	-	-	665	61	726
-	-	-	-	-	667	61	728
-	646	2 636	-	3 282	669	61	730

Fatores de Conversão EP	Energia Primária	Combustível	Emissões de CO ₂ - EC
1,0 Biomassa	- Biomassa	0,00% Biomassa	- Biomassa
2,5 Eletricidade	1 602 Eletricidade	35,03% Eletricidade	0,050 Eletricidade
2,5 Eletricidade	- Eletricidade	0,00% Eletricidade	- Eletricidade
	- Eletricidade	0,00% Eletricidade	- Eletricidade
	- Eletricidade	0,00% Eletricidade	- Eletricidade
1,0 Biomassa	- Biomassa	0,00% Biomassa	- Biomassa
1,0 Gás natural	2 972 Gás natural	64,97% Gás natural	0,131 Gás natural
	4573	100,00%	0,831 EC [Ton]

Figura 3.41. Extrato do módulo SRM do \$e³.

Finalmente, o módulo *ASP* (12) consolida os resultados e gera gráficos para vários cenários futuros, permitindo assim uma ampla análise do impacto dos principais parâmetros para estudos de rentabilidade.

O $\$e^3$ é uma ferramenta apta a realizar um grande número de simulações, mas seu uso está limitado pela plataforma em que foi desenvolvido. As versões posteriores ao Excel® 2003 apresentem um limite de 1.048.576 linhas por 16.384 colunas, por folha de cálculo. No modelo concebido, se exceder 65.536 linhas, uma macro divide o ficheiro em várias folhas de cálculo. Contudo, exercícios de simulação de rentabilidade no $\$e^3$ têm demonstrado que o esforço computacional exigido causa perda significativa de funcionalidade nesta plataforma, quando a quantidade de combinações de medidas é superior a cerca de 10.000.

3.9 Algoritmo Genético para Eficiência Energética em Edifícios (AGe³)

A abordagem da rentabilidade de medidas de eficiência energética contempla uma enorme quantidade de variáveis que se interrelacionam. Vários autores têm proposto análises de otimização multiobjectivo para ultrapassar o desafio de lidar com este grande número de variáveis ([13], [102], [133]).

O Algoritmo Genético para Eficiência Energética em Edifícios (AGe³) [134] foi desenvolvido para selecionar soluções que apresentem menor custo global e menores necessidades de energia primária. Entretanto, como já referido, existe uma relação de compromisso (conflito) entre estas duas grandezas: a redução das necessidades de energia primária tende a exigir maior custo de investimento e aumentar o custo global. Assim, este algoritmo de otimização multiobjectivo é utilizado para encontrar o conjunto aproximado de soluções Pareto eficientes do problema.

O AGe³ considera o problema de otimização multiobjectivo (MOP) num contexto de minimização, como é definido em Coelho et al. [135]. Seja \mathcal{F} um conjunto de duas funções objetivo $\{f_1, f_2\}$, $f_i: \mathbb{R}^n \Rightarrow \mathbb{R}$, o MOP é definido como:

$$\text{Minimizar: } y = \mathcal{F}(x) = \{f_1(x), f_2(x)\} \quad (53)$$

$$x = (x_1, \dots, x_n) \in \chi \subseteq \mathbb{R}^n \quad (54)$$

$$y = (y_1, \dots, y_m) \in \gamma \subseteq \mathbb{R}^m \quad (55)$$

sujeito a

$$x_i \in \{k_1, \dots, k_j\} \quad (56)$$

onde x é um vetor de n variáveis de decisão, enquanto y representa um vetor de objetivos com m dimensões. A restrição da Equação 56 representa os possíveis valores das variáveis x_i que ajudam a definir o espaço das variáveis de decisão ou espaço de decisão χ .

As funções objetivo constituem um espaço multidimensional chamado espaço dos objetivos, definido como γ . Para cada solução $x \in \chi_f$ existe um ponto y no espaço dos objetivos. Assim, χ_f define o espaço de possíveis soluções do dos objetivos γ_f . As funções objetivo, f_1 e f_2 , representam as necessidades de energia primária e custo global, respetivamente. Estas funções objetivo já foram definidas pelas Equações 11 e 22.

O problema de otimização combinatório proposto é solucionado por Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo (MOEA) baseado no “*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*” (NSGA-II) [136]. Este algoritmo foi escolhido por ser um dos mais populares da literatura e por apresentar bons resultados quando comparado com outras abordagens. Uma das principais características deste algoritmo é que ele trabalha com um conjunto de possíveis soluções conhecido como população e, através de operadores de cruzamento e mutação, busca encontrar o conjunto de soluções ótimas para problemas multiobjetivo numa simples execução.

O AGe³ utiliza operadores de cruzamento e mutação especialmente projetados para solucionar o problema em questão. Estes operadores são responsáveis por manipular as soluções (indivíduos da população) em busca de novas soluções que possuam melhor aptidão. Em outras palavras, o AGe³ serve para identificar soluções mais próximas da fronteira Pareto ótima e, além disso, que estejam o mais espalhadas possível a fim de cobrir toda a fronteira. Para isso, as soluções analisadas são codificadas como um vetor onde cada posição corresponde a uma variável de decisão. Assim, as características técnicas do edifício são atribuídas a cada variável.

Logo, cobertura (#1), paredes exteriores (#2), pavimento (#3) e janelas (#4) são representados pelo coeficiente de transmissão térmica U e seu efeito em necessidades de energia. As variáveis de aquecimento da área habitável (#5), produção de AQS (#6) e fontes de energia renováveis (#7) representam características de eficiência e seus efeitos no custo de energia. A Figura 3.42 ilustra as soluções utilizadas, onde cada posição tem um conjunto de possíveis valores.

$$\vec{\chi} = \begin{array}{ccccccc} \boxed{\#1} & \boxed{\#2} & \boxed{\#3} & \boxed{\#4} & \boxed{\#5} & \boxed{\#6} & \boxed{\#7} \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & \vec{x}_5 & \vec{x}_6 & \vec{x}_7 \end{array}$$

Figura 3.42. Representação das soluções utilizadas pelo AGe³.

A população inicial do algoritmo é inicializada de maneira aleatória e o operador de seleção utilizado é conhecido como torneio binário. O operador de cruzamento proposto é baseado em pontos de corte [135]. O exemplo ilustrado pela Figura 3.43 apresenta duas soluções hipotéticas para o problema ($parent_1$ e $parent_2$), escolhidas pelo operador de seleção. Um ponto de corte c é escolhido de forma aleatória onde $0 < c < 7$. No exemplo apresentado, o ponto de corte escolhido é igual a 3. Assim, as duas novas soluções ($offspring_1$ e $offspring_2$) são compostas por partes das soluções $parent_1$ e $parent_2$.

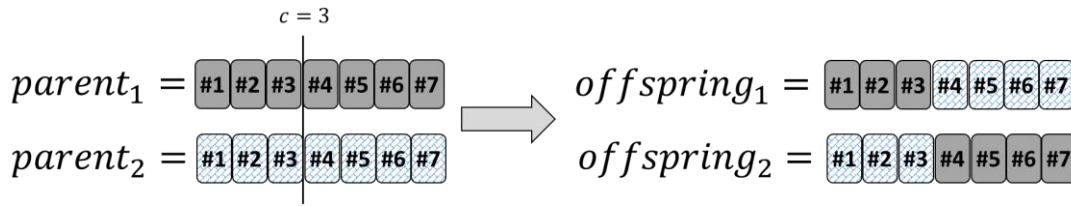


Figura 3.43. Ilustração do operador de cruzamento.

O operador de mutação proposto para manipular as soluções construídas é baseado num operador conhecido como *flip mutation* conforme [135]. Neste procedimento, cada posição de determinada solução possui uma probabilidade p_m de ser alterado. Este operador é aplicado aos indivíduos resultantes do processo de cruzamento. Para cada posição do vetor, selecionado de forma aleatória para ser alterado, um novo valor é obtido a partir do conjunto de valores possíveis. Este procedimento assegura que as novas soluções geradas sejam aceitáveis. O critério de parada dos algoritmos é o número de avaliações das funções objetivo.

Com o objetivo de validar o algoritmo proposto, foram avaliadas 154.000 possíveis medidas para reabilitação energética de um edifício de referência, sendo as soluções não-dominadas devidamente identificadas. A representação das soluções, bem como os operadores de cruzamento e mutação especializados para solucionar o problema foram apresentados.

Para construir estas soluções foi utilizado o módulo de “força bruta” do AGe³, combinando todas as variáveis de entrada. A busca por “força bruta” ou “busca exaustiva” é uma técnica de solução de problemas trivial que consiste em enumerar todos os possíveis candidatos da solução e verificar se cada um deles satisfaz o enunciado do problema.

Neste estudo, o algoritmo AGe³, baseado no NSGA-II, foi implementado em linguagem Java (JDK 1.6). O cálculo foi realizado num computador Intel Core i7, 2.2 GHz, com 8 GB de RAM e sistema operacional Windows 8.1. O critério de paragem utilizado pelo algoritmo foi o número de funções objetivo avaliadas.

O estudo mostra a distribuição das soluções no espaço dos objetivos, sendo possível observar agrupamentos que são associados a determinados equipamentos convencionais de aquecimento do ambiente (AC, CB, CG e EE). Os valores dos objetivos das soluções encontradas foram calculados e as soluções não dominadas devidamente identificadas.

O estudo sugere que o algoritmo de otimização baseado no NSGA-II, o AGe³, encontra soluções eficientes para o problema tratado sem necessidade de avaliar todo o espaço de busca. O problema de otimização foi resolvido em conformidade com as exigências do quadro metodológico proposto pela Comissão Europeia. Assim, sem grande esforço computacional, tomadores de decisão podem avaliar possíveis medidas para eficiência energética em edifícios, levando em consideração estimativas de custo global e necessidades de energia primária para a efetiva implementação das soluções.

3.10 Considerações gerais

As inúmeras combinações de possíveis medidas e a interação de variáveis utilizadas nos cálculos de rentabilidade dificultam a obtenção das soluções ótimas para reabilitação energética de edifícios, dentro dos limites impostos pela regulamentação. Isto vem dificultar também a atuação de vários intervenientes: autoridades, peritos, fornecedores de produtos e serviços e proprietários de edifícios.

Para além destas dificuldades, a metodologia recomendada pela Comissão Europeia e a regulamentação em vigor em Portugal apresentam oportunidades de melhoria, pois ambas as abordagens não são dirigidas a investidores. Assim, não considera questões de irreversibilidade e possibilidade de diferimento ligadas às opções reais de investimento.

Neste capítulo foi apresentada uma abordagem alternativa dirigida também aos proprietários de edifícios (em seu papel de investidores) e que auxilia o trabalho dos demais intervenientes. Foi descrito um método de seleção de soluções e avaliação da rentabilidade de medidas de eficiência energética, incluindo o uso de fontes de energia renováveis. O método divide-se em análise económica de soluções, dimensionamento de sistemas de energias renováveis, simulação de desempenho energético do edifício, simulação de rentabilidade de medidas e, finalmente, análise de sensibilidade dos principais parâmetros utilizados.

A abordagem do método parte do princípio de que os hábitos de climatização e os equipamentos utilizados para arrefecimento, aquecimento e preparação de águas quentes sanitárias são os itens que mais influem nos custos de consumo energético em edifícios e, por conseguinte, na composição dos pacotes de rentabilidade.

Para ilustrar esta abordagem, utiliza-se o exemplo de Portugal e, para a tornar aplicável com âmbito nacional, adota-se uma metodologia que permite caracterizar o comportamento das edificações em diferentes zonas climáticas deste país. Propõe-se, utilizar-se a relação entre os graus-dias de aquecimento e radiação solar a sul para diferentes regiões de Portugal continental. A seleção de três regiões permite caracterizar o comportamento das edificações em diferentes zonas climáticas deste país, sem no entanto aumentar substancialmente a quantidade de localidades a serem simuladas.

Os hábitos de climatização dos portugueses são estimados com base em dados estatísticos nacionais que confirmam consumos **reais** de energia útil, para aquecimento e preparação de águas quentes sanitárias, bastante inferiores aos valores de necessidades **nominais** estimados através do método sazonal.

Considerando que a Comissão Europeia recomenda que o custo global de medidas de eficiência seja avaliado sob o critério do Valor Atualizado Líquido (VAL), o presente método complementa esta abordagem e propõe também o avaliar sob o critério do retorno sobre o investimento (ROI), bem como analisar as opções reais relativas à reabilitação energética.

Quanto às opções reais associadas aos investimentos em reabilitação energética, o método considera que os proprietários de edifícios podem decidir pelo diferimento, abandono, contração, expansão ou troca de determinada medida de isolamento da construção, aquecimento e arrefecimento do ambiente, preparação de águas quentes sanitárias ou produção e o uso de energias renováveis, conforme o ROI associado a cada solução e tendo em conta requisitos mínimos regulamentares

O método dedica especial atenção à variabilidade dos custos e ao conjunto de materiais disponíveis para o isolamento térmico da envolvente de edifícios. Como estes estudos de rentabilidade trabalham com um horizonte alargado para o ciclo de investimento, o método inclui uma análise de sensibilidade com cenários futuros para variação das necessidades reais de energia útil, evolução dos preços de energia e taxas de desconto.

Visando reduzir a complexidade destes estudos, o método propõe um procedimento expedito para indicação de rentabilidade. Com base em estudos preliminares, neste capítulo foi ilustrada a aplicação desta abordagem utilizando o exemplo de um edifício construído antes de 1960, localizado no centro de Portugal. Foi demonstrado que o investimento em sistemas torna-se dominante sobre o investimento em isolamento e faz com que a opção de isolamento de rentabilidade ótima varie conforme o equipamento considerado.

A pouca influência das janelas na redução de necessidades de energia útil deveu-se à maior influência deste elemento da envolvente nas necessidades de arrefecimento, não consideradas nesta análise. No caso das janelas, o resultado económico é influenciado pela interação entre resistência térmica, fator solar do envidraçado e, obviamente, o custo de substituição, consoante a estação em estudo (arrefecimento ou aquecimento).

Tendo sido demonstrada a dominância do sistema de aquecimento sobre as opções de isolamento, no que se refere aos quesitos de rentabilidade, o presente método demonstrou que é possível estabelecer uma equação onde a soma das opções mais rentáveis de isolamento de cobertura, paredes exteriores e pavimento, dado um determinado sistema de aquecimento da área habitável, pode representar o pacote de rentabilidade ótima. Isto implica que a análise económica de soluções determine, previamente, em qual sistema de aquecimento da área habitável deverá ser realizado o investimento.

Como a variável dos sistemas adquire relevância neste método, foi demonstrado um procedimento expedito para indicação de sua rentabilidade. A complexidade da avaliação da rentabilidade de sistemas foi reduzida a poucas variáveis que permitem um cálculo independente de detalhes do edifício de referência, com base nas necessidades reais de energia útil para aquecimento e águas quentes sanitárias.

Este cálculo expedito assume que as necessidades de energia útil para preparação de AQS podem ser fixadas como constantes, uma vez que não dependem da configuração da envolvente do edifício. No entanto, esta variável é mantida nos cálculos porque os requisitos mínimos para desempenho energético a consideram. De salientar que o cálculo exigido pela regulamentação

portuguesa parece indicar necessidades nominais de energia útil para preparação de AQS bastante próximas do consumo real, em âmbito nacional.

Obviamente, o procedimento expedito serve apenas para selecionar as soluções que serão consideradas nas simulações de rentabilidade e também para apontar os pacotes de rentabilidade ótima mais prováveis, restando referir que as soluções de rentabilidade ótima devem cumprir requisitos mínimos estabelecidos de desempenho energético de edifícios. Uma vez que o procedimento expedito não tem a pretensão de substituir as simulações de rentabilidades de medidas, são apresentados dois programas para aplicação do presente método em diferentes contextos.

O Sistema de Eficiência Energética em Edifícios ($\$e^3$) é um programa que foi concebido em Microsoft Excel® e com recurso a macros de Visual Basic 6.0 que realiza o estudo até 10.000 pacotes de medidas. Ultrapassado este limite, o esforço computacional exigido causa uma perda significativa de funcionalidade, nesta plataforma.

O Algoritmo Genético para Eficiência Energética em Edifícios (AGe^3) é utilizado para selecionar o conjunto aproximado de soluções Pareto eficientes que apresentem menor custo global e menores necessidades de energia primária. Os valores dos objetivos das soluções encontradas são calculados e as soluções não dominadas devidamente identificadas, sem necessidade de avaliar todo o espaço de busca.

Seja através da utilização do procedimento expedito, do $\$e^3$ ou do AGe^3 , o cálculo da rentabilidade ótima de medidas de eficiência energética e uso de fontes de energia renováveis é solucionado em conformidade com as exigências do quadro metodológico proposto pela Comissão Europeia. Para a disseminação do uso destas ferramentas, é certamente necessário o desenvolvimento de interfaces, conforme o utilizador. Por exemplo, os peritos estão capacitados à utilização mais técnica, enquanto os fornecedores, sem prejuízo desta utilização, estão mais interessados nos aspetos comerciais para posicionamento de seus produtos e serviços no mercado.

Já os proprietários de edifícios necessitam de uma interface que facilite o uso intuitivo das ferramentas. O investidor necessita de critérios que relacionem o montante de capital investido ao retorno do investimento em medidas de eficiência energética. Assim, os intervenientes e tomadores de decisão podem considerar o uso destas ferramentas, conforme sugerido na Tabela 3.12.

Em suma, a tomada de decisão deve ser subsidiada por informações abrangentes que possibilitem a avaliação do risco e da incerteza, para aclarar as opções reais do investimento em reabilitação energética. No capítulo 4, o método proposto é aplicado a três casos de estudo, sendo obtidas relevantes conclusões.

Tabela 3.12. Ferramentas para aplicação do método

<i>Intervenientes</i>	<i>Procedimento Expedito</i>	<i>§e³</i>	<i>AGe³</i>
Autoridades		AES, dFER, SDE, SRM e ASP	Otimização multiobjetivo e obtenção do conjunto de soluções Pareto
Peritos	Procedimento com interface técnica	SRM	
Fornecedores	Procedimento com interface técnica e comercial	SRM e ASP	
Proprietários	Procedimento com interface intuitiva	SRM com interface intuitiva	

***CAPÍTULO 4 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E
DISCUSSÃO DE RESULTADOS***

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta três casos de estudo como exemplos de aplicação da fundamentação teórica e do método proposto e neste trabalho. Seguem-se todos os conceitos apresentados no capítulo 3. Os cálculos de desempenho energético dos edifícios estudados são realizados com base na EN ISO 13790:2008, “*Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*” [69], e os cálculos de rentabilidade de medidas atendem plenamente ao Regulamento Delegado (UE) n.º 244 [10], mas não se limitando a este documento. Objetiva-se com isto a obtenção de parâmetros de comparação, a identificação de oportunidades de melhoria e o embasamento de recomendações.

Para execução dos cálculos, são utilizados o Sistema de Eficiência Energética em Edifícios ($\$e^3$) e o Algoritmo Genético para Eficiência Energética em Edifícios (AGe³), sendo simuladas todas as combinações para as soluções selecionadas. Os parâmetros inseridos, bem como os resultados obtidos nestes programas são prospectados nas quatro fases do método demonstrado no capítulo 3: Fase 1 - Análise Económica de Soluções (AES) e Dimensionamento de sistemas FER (dFER); Fase 2 - Simulação de Desempenho Energético (SDE); Fase 3 - Simulação de Rentabilidade de Medidas (SRM) e Fase 4 - Análise de Sensibilidade de Parâmetros (ASP).

É estudado o comportamento energético de edifícios localizados em Portugal e é analisada a rentabilidade das principais medidas de eficiência energética adequadas à sua reabilitação, sem que as soluções selecionadas alterem de forma inaceitável o seu carácter ou o seu aspeto. Os resultados apresentados são sempre comparados com os requisitos mínimos de desempenho energético em vigor para cada situação, em Portugal. É também avaliada a utilização de fontes de energia renováveis (FER), através de estimativas de rentabilidade deste tipo de investimento ao longo do ciclo de vida do edifício.

No primeiro caso de estudo, o edifício de referência é virtual e representativo do parque habitacional de edifícios unifamiliares contruídos antes de 1960, em Portugal. Avalia-se a rentabilidade de um conjunto alargado de medidas e é também utilizado o algoritmo genético para seleção de pacotes. Com base em estatísticas de consumo efetivo atual, em que as pessoas só climatizam compartimentos onde permanecem, aplica-se o fator de redução e considera-se 13,4% das necessidades de energia útil inicialmente estimadas pelo método sazonal.

No segundo caso de estudo, é apresentado um edifício real de uso misto anterior a 1919, o qual representa uma categoria bastante recorrente nos centros antigos de toda a Europa - a dos edifícios de interesse histórico e arquitetónico. É proposta uma análise integrada, económica e ambiental, para um apartamento neste edifício. Com base em estudo comparativo entre o método sazonal e o dinâmico e após ser estabelecido um determinado perfil de ocupação, aplicam-se fatores de redução de consumo, considerando-se 54 a 68% das necessidades de energia útil inicialmente estimadas pelo método sazonal, conforme a localização. É considerada a climatização de 100% da área útil interna, nos períodos em que o apartamento está ocupado.

No terceiro caso de estudo, é abordada a perceção dos moradores (proprietários ou inquilinos) em relação aos investimentos em reabilitação energética de edifícios. A habitação apresentada aos entrevistados é virtual e representativa dos edifícios unifamiliares contruídos em Portugal, de 1961 a 1990. Para se ter em conta a crescente procura por condições de conforto, considera-se 20% das necessidades de energia útil inicialmente estimadas pelo método sazonal, portanto acima das estatísticas de consumo efetivo atual (13,4%). Ainda sim, considera-se somente a climatização de compartimentos onde as pessoas permanecem.

A Tabela 4.1 resume as características mais relevantes dos edifícios e das abordagens dos casos de estudo.

Tabela 4.1. Resumo das características dos edifícios dos casos de estudo.

<i>Características dos edifícios e abordagem</i>	<i>Casos de estudo</i>		
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>
Tipo	Virtual	Real	Virtual
Categoria	Unifamiliar	Multifamiliar	Unifamiliar
Tipologia	T2	T3	T3
Área útil	80m ²	119m ²	100m ²
Quantidade de pisos	1	2	1
Período de construção	<= 1960	<= 1919	1961 a 1990
Estimativa de energia	Sazonal	Sazonal e dinâmico	Sazonal
Consumo de energia útil	Efetivo atual	Perfil de ocupação	Crescente procura
Fator de redução	13,4%	54, 66 e 68%	20%
Localizações	987, 1570, 1924 GD	987, 1304, 1924 GD	1570 GD
Ferramenta de simulação	Se ³ , AGe ³	Se ³	Se ³
Combinações de medidas	154.000	4.116	48
Especificidade	Algoritmo Genético	Histórico, ACV, SimaPro8	Análise Multicritério
Enfoque	Económico	Ambiental e económico	Socioeconómico

Nota: T2 e T3 significam 2 e 3 quartos, respetivamente; GD significa graus-dias; ACV significa Análise de Ciclo de Vida; Multicritério refere-se ao método aplicado para tomada de decisão.

A aplicação do método proposto em diferentes contextos busca comprovar sua flexibilidade e abrangência. A relevância dos casos de estudo selecionados prende-se à sua representatividade do parque edificado. A diversidade de cenários e abordagens pode permitir alcançar conclusões de caráter genérico e recorrente, em ambas as perspetivas, macroeconómica e financeira. Os diferentes enfoques pretendem cobrir os três pilares do desenvolvimento sustentável: a viabilidade económica, o equilíbrio ambiental e a equidade social.

4.1 Caso de estudo I – edifício virtual

4.1.1 Introdução

A União Europeia pretende garantir que os requisitos mínimos para desempenho energético dos edifícios não se desviem do critério de rentabilidade estabelecido para medidas de eficiência energética. O quadro metodológico proposto no Regulamento Delegado n.º 244 é dirigido a autoridades nacionais (não a investidores) e a rentabilidade não é calculada para cada caso, mas sim para o desenvolvimento de normas aplicáveis em âmbito nacional. A metodologia proposta não considera questões de irreversibilidade (quando, em caso de arrependimento, não é possível recuperar todo ou a maior parte do capital investido) e possibilidade de diferimento (adiamento) ligadas às opções reais, intrínsecas a este tipo de investimento.

A reabilitação energética de edifícios deve, para além de salvaguardar a valorização arquitetónica e patrimonial do edificado, contribuir para a sustentabilidade energética. No entanto, custa mais implementar medidas de eficiência energética em edifícios existentes do que em novos. Existe um grande número de possíveis combinações de medidas de eficiência que são ambiental e economicamente viáveis e, apesar da complexidade, é possível otimizar as soluções disponíveis para a tomada de decisão em prol da reabilitação energética. Fornecendo uma abordagem sólida para determinar as vantagens deste tipo de investimento, os Estados-Membros podem assegurar que os requisitos mínimos são também rentáveis para a maioria dos investidores e assim promover eficiência energética e o uso de energias renováveis em edifícios.

Esta promoção da reabilitação energética pode ser obtida através da melhoria do desempenho da envolvente. A interação entre custo e espessura de isolamento, custo de operação e eficiência do sistema de aquecimento, é determinante para os cálculos de rentabilidade. Considerando a estreita faixa de variação no custo de produção de calor por parte dos sistemas de aquecimento disponíveis no mercado (dentro de uma mesma tecnologia), torna-se preponderante estudar a influência da variação de custo do isolamento na determinação da solução de rentabilidade ótima.

O presente caso de estudo avalia medidas de melhoria segundo critérios de rentabilidade económica, aplicáveis a edifícios de habitação portugueses anteriores a 1960. Estes edifícios representam 29% do total de habitações [17] e foram construídos antes da existência de regras de desempenho energético, pelo que apresentam à partida um elevado potencial para o aumento de eficiência energética. Para este efeito é definido um edifício de referência representativo deste parque habitacional.

Para além do estudo do comportamento energético deste edifício, em face de diferentes soluções construtivas de reabilitação da sua envolvente (cobertura, fachadas, pavimento e envidraçados), este caso de estudo analisa detalhadamente a influência da variabilidade dos dados climáticos, dos custos de intervenção (aquisição de materiais e equipamentos, mão-de-obra e manutenção) e do uso de energias renováveis, na determinação dos níveis ótimos de rentabilidade. Procedese também a uma análise de sensibilidade da variação das necessidades de energia útil, dos

preços de energia e da denominada taxa de desconto. Adicionalmente, uma análise da influência das opções reais em investimentos em reabilitação energética dos edifícios é também proposta.

O problema de otimização proposto é resolvido com recurso aos programas $\$e^3$ e AGe^3 . Como resultado, é fornecida uma comparação entre os níveis ótimos de rentabilidade e o retorno sobre o investimento, em ambos os programas de cálculo, para um conjunto de soluções adequadas ao edifício de referência.

4.1.2 Descrição do edifício

As características dos edifícios ao longo do tempo dependem de aspetos sociais e tecnológicos, além de requisitos legais. Uma vez que a primeira norma portuguesa de desempenho energético data de 1990 ([50], [110]), as casas construídas antes de 1960 não seguiram requisitos específicos. Assim, para este primeiro caso de estudo, foi definido um edifício de referência representativo das construções de antes de 1960.

As características geométricas, térmicas e de sistemas técnicos deste edifício são estabelecidas utilizando-se dados estatísticos fornecidos pela Agência para a Energia (ADENE), disponíveis no Sistema de Certificação Energética (SCE) [49]. São também utilizados os dados estatísticos de inquéritos a residentes fornecidos pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) [17].

Com base nesses dados conclui-se que a tipologia mais representativa dessa época de construção é a habitação unifamiliar com um pavimento térreo com dois quartos e área útil de 80 [m²]. A maioria destas habitações foi construída em alvenaria de pedra, janelas em madeira com vidro simples, enquanto as coberturas são geralmente inclinadas com telhas cerâmicas colocadas sobre uma estrutura de madeira, sem isolamento [68]. Verifica-se que o sistema para aquecimento de área habitável mais frequente consiste na utilização de resistências elétricas, cuja eficiência nominal é de 1,00. Os mesmos dados permitem concluir que os esquentadores a gás são os mais utilizados na preparação de águas quentes sanitárias (AQS), para os quais a eficiência média assumida é igual a 0,60. Cumpre salientar que o edifício de referência não possui isolamento nas tubagens de distribuição de AQS.

As principais dimensões do edifício de referência, ilustradas na Figura 4.1, são as indicadas na Tabela 4.2. Todas estas dimensões correspondem a medições obtidas pelo interior do edifício. A relação entre a área envidraçada e a área útil de pavimento corresponde a 15% e as janelas distribuem-se equitativamente nas quatro orientações das fachadas do edifício (N, S, E e W). Assume-se que as janelas apresentam um fator solar g_w de 0,85 e um valor de transmissão térmica, U , de 5,10 [W/(m².°C)]. Assume-se que os dispositivos de oclusão são cortinas coloridas claras de tecido fino, resultando um fator solar de 0,38, para a janela com este dispositivo ativo a 100%.

Tabela 4.2. Características dimensionais do edifício de referência.

A_f (área do pavimento)	80 m^2
h (pé-direito)	$2,70 \text{ m}$
A_e (área da envolvente)	$84,56 \text{ m}^2$
A_w (área das janelas)	12 m^2
A_r (área da cobertura)	80 m^2



Figura 4.1. Representação esquemática do edifício de referência – moradia unifamiliar.

Os coeficientes de transmissão térmica médios de cada solução da envolvente, U , encontram-se expressos na Tabela 4.3, onde os subscritos r , e , f e w identificam cobertura, paredes, pavimento e janelas, respetivamente. Adicionalmente, indica-se o fator solar médio dos vidros, g_w , e a taxa média horária de renovação do ar, rph . A inércia térmica do edifício corresponde à classe média, ou seja, apresenta uma massa superficial disponível para acumulação de energia entre 150 e $400 \text{ [kg/m}^2\text{]}$.

Tabela 4.3. Características térmicas do edifício de referência.

U_r	$2,80 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$
U_e	$2,00 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$
U_f	$1,65 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$
U_w	$5,10 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$
g_w	$0,85$
rph	$0,4 \text{ h}^{-1}$

Em relação aos dados climáticos, as três localizações selecionadas para este estudo estão associadas a diferentes regiões climáticas (987, 1570 e 1924 graus-dias - GD).

4.1.3 Aplicação do método e discussão de resultados

Neste caso de estudo, foram simuladas todas as combinações para as soluções selecionadas, percorrendo-se as quatro fases do método descrito no capítulo 3.

A AES indicou o poliestireno expandido (EPS) como a opção mais rentável para a aplicação de isolamento térmico na fachada, pelo interior, sobre a laje de esteira de cobertura e sobre o pavimento. Considerou-se a condutibilidade térmica do material igual a 0,036 [W/(m.°C)]. Ao seu preço médio de € 2,30 por resistência térmica unitária [€/r] foi somado o valor de 17 [€/m²] que representa os preços de aplicação, composto por mão-de-obra e acessórios. Foram considerados preços de aplicação mais elevados para o isolamento do pavimento (25 [€/m²]), dadas as dificuldades técnicas acrescidas para a implementação desta medida em edifícios existentes.

Para o limite superior de preços assumiu-se o aglomerado de cortiça expandida com massa volumétrica média (ICB-MD) com condutibilidade térmica igual a 0,045 [W/(m.°C)], com o preço do material de € 15,48 por resistência unitária [€/r] e de 13,25 [€/m²] para aplicação. Para ter em conta preços mais elevados para o isolamento do pavimento, assumiu-se 31,57 [€/m²], valor esse que representa o preço de aplicação. Foi definida a faixa de variação das espessuras do material entre 40mm e 160mm, o que tende a cobrir as necessidades de isolamento para Portugal [137], conforme estudos preliminares. Note-se que o edifício, em sua configuração original, não possui isolamento na envolvente. Apresenta-se, na Tabela 4.4, as várias soluções consideradas para cada uma das partes da envolvente, as quais foram combinadas entre si.

Tabela 4.4. Espessuras de isolamento térmico e coeficientes de transmissão térmica das soluções de cobertura, paredes e pavimento.

<i>Cobertura</i>		<i>Paredes</i>		<i>Pavimento</i>	
e [mm]	U [W/(m ² .°C)]	e [mm]	U [W/(m ² .°C)]	e [mm]	U [W/(m ² .°C)]
0	2,80	0	2,00	0	1,65
60	0,49	40	0,62	40	0,58
80	0,39	60	0,46	60	0,44
100	0,32	80	0,37	80	0,35
120	0,27	100	0,31	100	0,30
140	0,24	120	0,26	120	0,25
160	0,21	140	0,23	140	0,22

A AES também indicou a janela em PVC (policloreto de vinil) como opção mais adequada. Nesta condição, a janela com vidros duplos (incolores), com 6mm (externo) e 4mm (interno), e caixa de gás argon de 16mm apresenta um fator solar de 0,58 e um coeficiente de transmissão térmica de 1,87 [W/(m².°C)].

As simulações preliminares realizadas com o procedimento expedito indicaram o Ar Condicionado (AC) combinado com o Esquentador a Gás (EG) e a Caldeira a Gás (CG) como sistemas competitivos para a gama de necessidades de energia útil considerada neste caso de estudo, conforme pode ser observado na Figura 4.2.

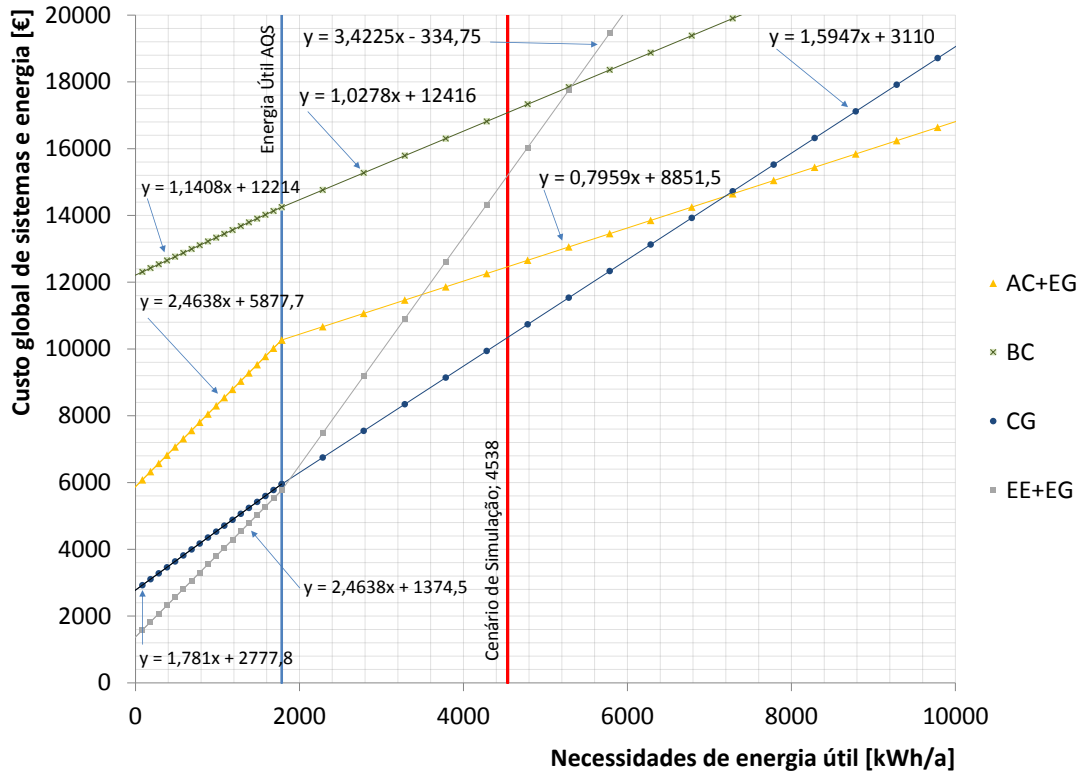


Figura 4.2. Indicação de custo global de sistemas e energia para um cenário de simulação de 4.538 [kWh/a] de necessidades de energia útil para aquecimento e AQS, pelo procedimento expedito.

O AC tem como principal vantagem sua alta eficiência ($\eta = 4,3$) e a CG requer baixo investimento inicial, tendo também um fator de conversão de energia primária reduzido ($P_{h,k} = 1,0$). Note-se que a CG não necessita o suporte de um sistema para preparação de AQS, sendo capaz de executar as duas funções. A Bomba de Calor (BC) não apresentou competitividade e a Caldeira a Biomassa (CB) não foi considerada por não haver espaço disponível para sua instalação. O Emissor Elétrico (EE) combinado com EG, já presentes no edifício de referência, também são considerados para comparação de resultados (ver Tabela 4.5).

Um volume total de 120 litros por dia (40 litros por pessoa) foi assumido para preparação de AQS. Tendo por base o consumo efetivo de energia no setor residencial, optou-se por considerar que as necessidades de aquecimento, para efeito do estudo de rentabilidade, correspondem a 13,4% do valor estimado com base no método sazonal. Reitera-se que, no caso de edifícios anteriores a 1960, o valor das necessidades de energia primária, PE , não pode exceder em mais de 50% o limite definido para o edifício com os parâmetros regulamentares de referência [16].

Tabela 4.5. Sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados.

<i>h,k</i>	<i>Sistema de Aquecimento</i>			<i>w,k</i>	<i>Sistema de preparação de AQS</i>		
	<i>Equipamento</i>	<i>Combustível</i>	<i>Eficiência</i>		<i>Equipamento</i>	<i>Combustível</i>	<i>Eficiência</i>
<i>h,1</i>	Emissor Elétrico	Eletricidade	1,00	<i>w,1</i>	Esquentador a Gás	Gás	0,60
<i>h,2</i>	Ar Condicionado	Eletricidade	4,30	<i>w,2</i>	Esquentador a Gás	Gás	0,60
<i>h,3</i>	Caldeira a Gás	Gás	0,93	<i>w,3</i>	Caldeira a Gás	Gás	0,83

Nota: *h,k* identifica cada sistema de aquecimento e *w,k* identifica cada sistema de preparação de AQS, onde *h,1* combina somente com *w,1* e assim por diante.

Na primeira parte do estudo, na SRM considerou-se pacotes de reabilitação energética que combinam alternativas de isolamento térmico (incluindo a opção sem isolamento) para a cobertura (7), paredes exteriores (7) e pavimento (7), considerando seus respectivos limites de preços (2), opções de janelas (2) e a utilização de diferentes sistemas para aquecimento da área habitável e preparação de AQS (3). Cada pacote foi calculado para as três localidades diferentes, 987, 1570 e 1924 GD. A avaliação paramétrica resultou em **4.116** pacotes de reabilitação energética calculados para cada localidade (12.348 no total).

A SRM considerou taxas de desconto de 6% e 3% para as perspectivas financeira e macroeconómica, respetivamente, além de um ciclo económico de 30 anos. Finalmente, foi realizada a ASP, comparando-se a rentabilidade em diferentes cenários.

4.1.3.1 Resultados do $\$e^3$

4.1.3.1.1 Efeito da variabilidade de custo do isolamento térmico

Tendo em conta a estreita faixa de variação no custo de operação do sistema de aquecimento (dentro de uma mesma tecnologia), variou-se somente o custo do isolamento e a eficiência do referido sistema, gerando alterações no comportamento da curva de rentabilidade. Na Figura 4.3 são apresentados os resultados do custo global de pacotes de reforço térmico da envolvente, para a localização com 1570 GD.

Consideram-se três cenários: a manutenção do sistema de aquecimento de baixa eficiência do edifício de referência (Emissor Elétrico - EE, $\eta = 1,0$), o qual apresenta um alto fator de conversão de energia primária ($P_{h,k} = 2,5$); a substituição deste sistema por um de alta eficiência (Ar Condicionado - AC, $\eta = 4,3$); e ainda o cenário de substituição deste sistema original por um sistema de baixo fator de conversão (Caldeira a Gás - CG, $P_{h,k} = 1,0$).

A análise baseia-se na perspetiva financeira para uma taxa de desconto de 6%, considerando os limites inferior e superior de custo do isolamento. Com esta variação de custo, verifica-se uma significativa alteração no custo global de cada um dos pacotes, o que revela a importância que o custo de investimento inicial tem nos resultados, afetando substancialmente a forma das curvas de rentabilidade e, conseqüentemente, a rentabilidade ótima.

O custo do isolamento no limite superior provoca curvas mais inclinadas que no caso do custo no limite inferior, sendo pouco favorável ao investimento em maiores espessuras.

Com este custo do isolamento, mesmo para o sistema menos eficiente (EE), as soluções com menor custo global são referentes a níveis de isolamento térmico entre baixos e intermédios.

A representação dos limites regulamentares atuais permitem-nos concluir que há pacotes que, apesar de apresentarem baixos custos globais, não verificam as atuais exigências.

De realçar que, de acordo com a metodologia portuguesa, os limites regulamentares variam também em função da tecnologia de climatização selecionada.

Por esse motivo é que o sistema de aquecimento de baixo fator de conversão de energia primária apresenta um limite regulamentar menor do que o sistema de baixa eficiência.

Destaca-se, ainda, que esta opção, em alternativa a um limite fixo, acaba por possibilitar maior flexibilidade na escolha do sistema de aquecimento que atenda aos requisitos.

O limite regulamentar para o caso do sistema de baixo fator de conversão de energia primária permite que um maior número de pacotes garanta a verificação, admitindo situações com baixo nível de isolamento.

Já no caso do sistema de baixa eficiência e alto fator de conversão de energia primária, a verificação está mais dependente do nível de isolamento da envolvente.

A interação entre custo e espessura de isolamento [$\text{€}/r$], custo de operação do sistema de aquecimento [$\text{€}/\text{kWh}$] e eficiência [η] deste mesmo sistema, é determinante para os cálculos de rentabilidade.

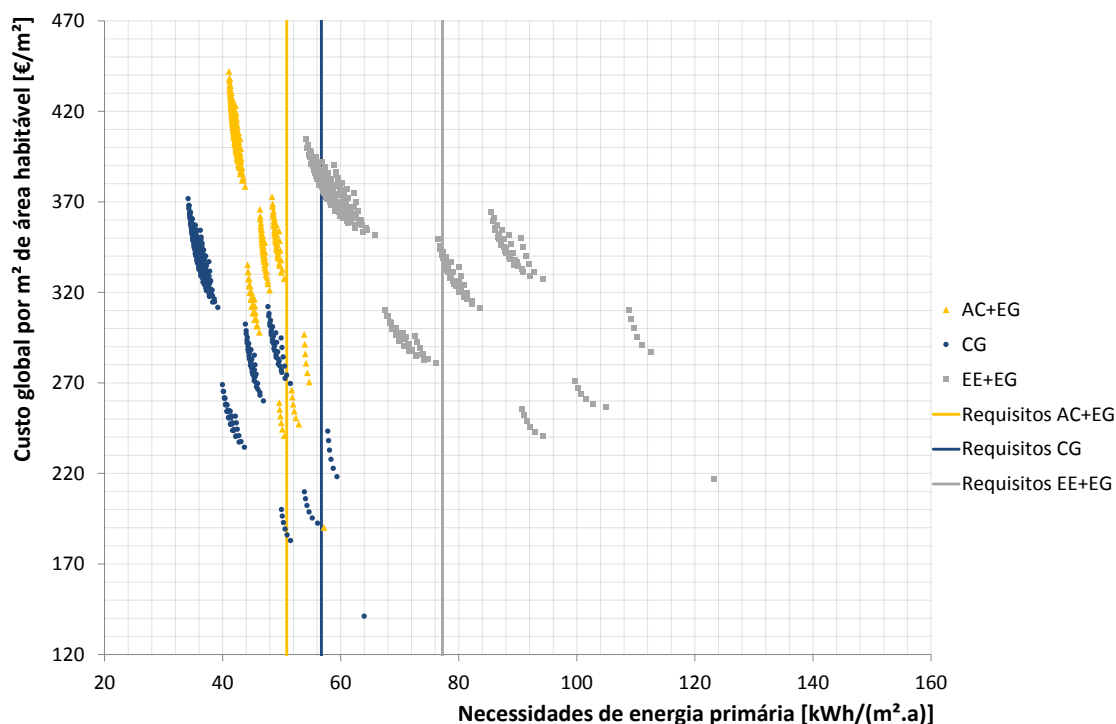
Comparando-se o sistema original do edifício de referência, de baixa eficiência (EE, $\eta = 1,0$), com um sistema de alta eficiência (AC, $\eta = 4,3$), nota-se que o investimento em sistemas eficientes pode reduzir a extensão da intervenção na envolvente, como observado na Figura 4.4.

Nestes gráficos, quanto menores forem as espessuras de isolamento, maiores são as necessidades de energia primária. As sete curvas para cada opção de sistemas, representam o isolamento individual de elementos da envolvente (cobertura, paredes exteriores e pavimento), ou combinação destes.

Os pontos isolados representam o cenário sem qualquer isolamento, para cada um dos sistemas.

A diferença de 150% nos fatores de conversão de energia primária (de 1,0, para CG e 2,5, para AC e EE), faz com que esta variável tenha um impacto considerável nos cálculos.

a)



b)

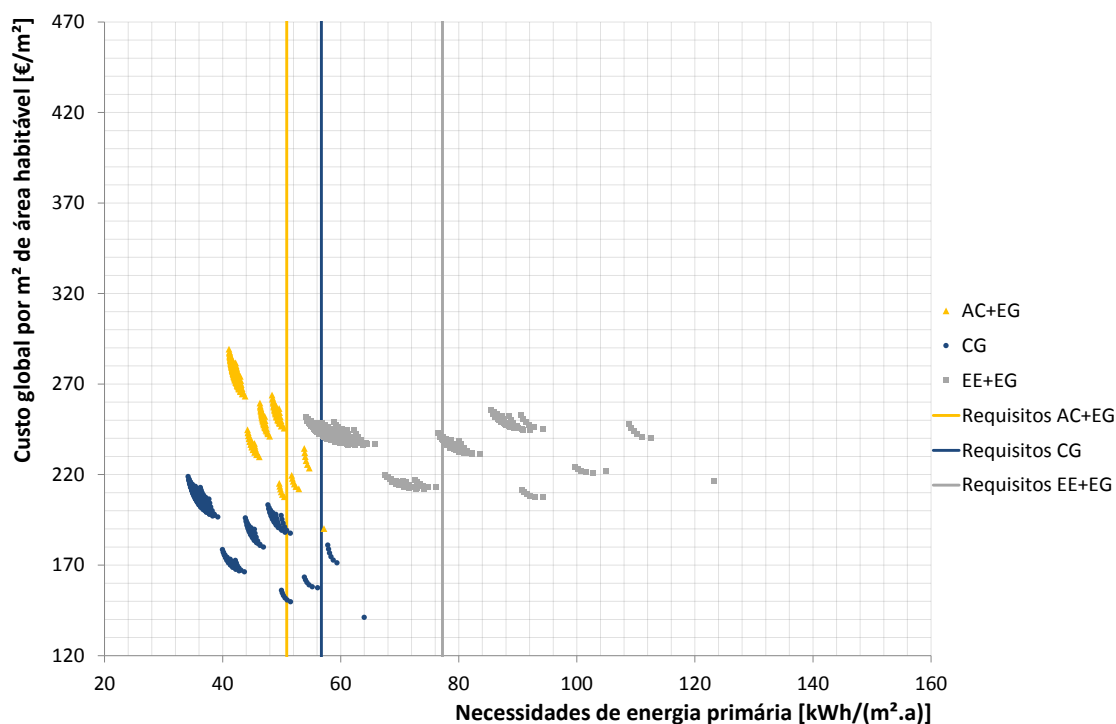


Figura 4.3. Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD: a) limite superior do custo do isolamento; b) limite inferior do custo do isolamento.

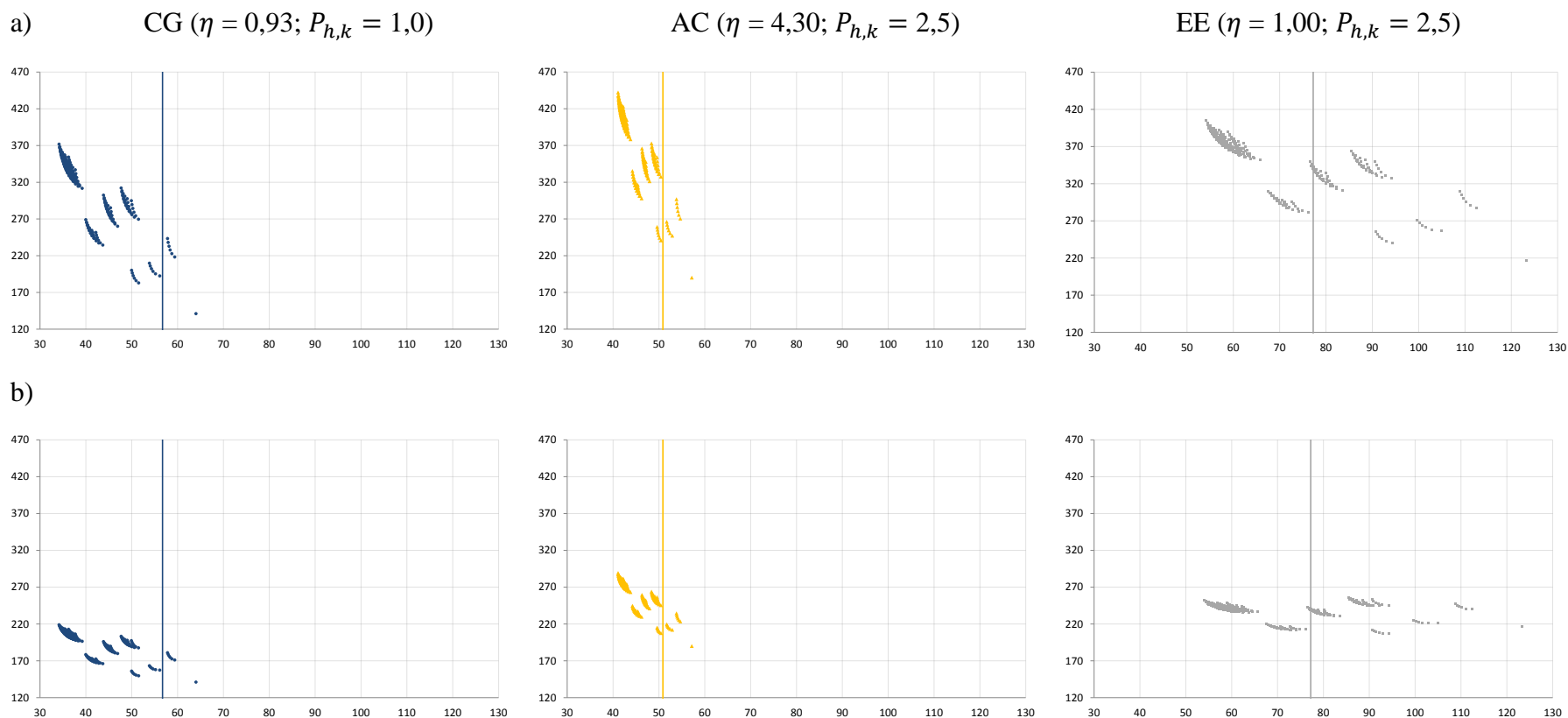


Figura 4.4. Custo global (eixo vertical y , em $[\text{€/m}^2]$) e necessidades de energia primária (eixo horizontal x , em $[\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$), na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD – análise de sistemas de aquecimento: a) limite superior do custo do isolamento; b) limite inferior do custo do isolamento.

4.1.3.1.2 Efeito da variabilidade dos dados climáticos

A variação das zonas climáticas de inverno I1, I2 e I3, caracterizadas pelos três níveis de graus-dias, 987, 1570 e 1924 GD, permite constatar que os pacotes de medidas que representam a rentabilidade ótima podem sofrer alterações, conforme a localização do edifício, mesmo num país com as dimensões de Portugal. Na Figura 4.5, encontram-se os resultados do custo global admitindo combinações para todos os sistemas e custos de isolamento correspondentes ao limite inferior para as duas localizações extremas, 1924 GD (Figura 4.5-a) e 987 GD (Figura 4.5-b). É possível observar que os resultados para 1924 GD apresentam uma maior variação de necessidades de energia primária e dos custos globais dos diferentes pacotes.

Enquanto os níveis ótimos de rentabilidade variam entre 50 a 52 [kWh/(m².a)] nas necessidades de energia primária para 1570 GD (Figura 4.3-b), para 1924 GD, a rentabilidade ótima varia entre 56 e 58 [kWh/(m².a)]. Para o 987 GD variam entre 40 e 41 [kWh/(m².a)], aproximadamente. Cumpre salientar que o pacote CG, sem qualquer isolamento ou troca de janelas ($PE = 49$ [kWh/m².a]; $GC = 121$ [€/m²]) cumpre os requisitos, excepcionalmente nesta localidade. No entanto, esta opção não foi considerada aceitável, pela proximidade com o limite regulamentar e também para favorecer a comparabilidade com as demais localidades.

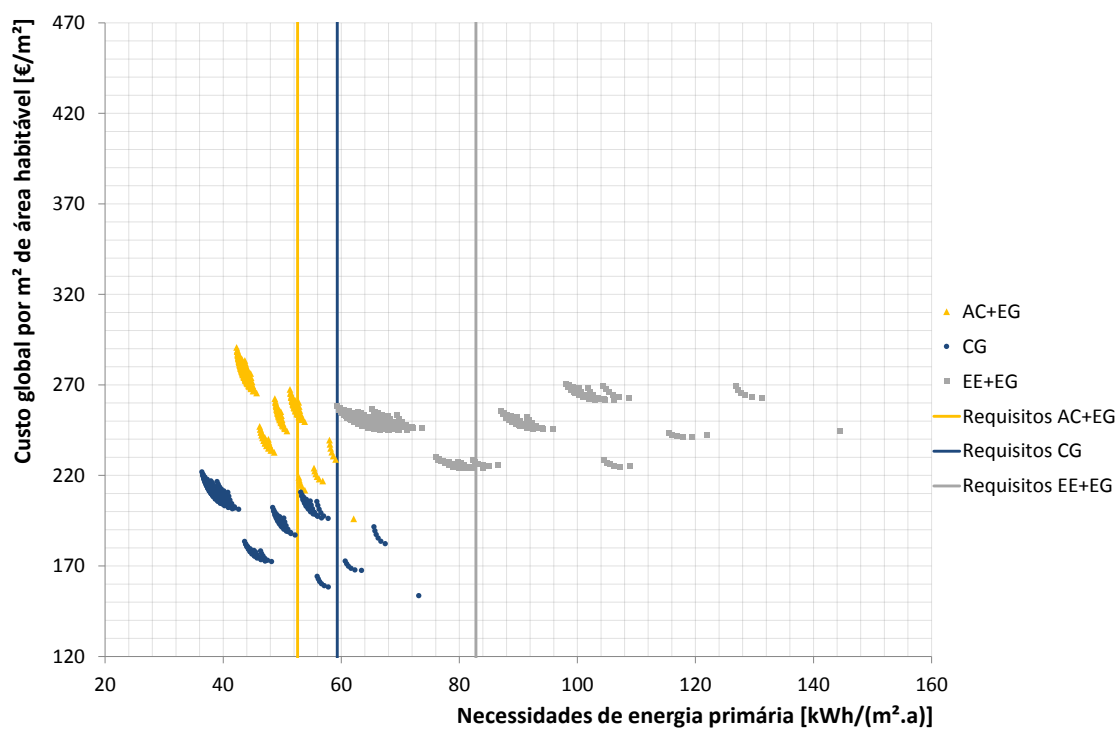
Em todas as localidades, a rentabilidade ótima está diretamente ligada ao isolamento somente da cobertura. Na Tabela 4.6 os coeficientes de transmissão térmica dos pacotes de medidas que incluem isolamento de elementos da envolvente opaca e que representam as melhores espessuras são comparados com os de referência, estabelecidos na regulamentação portuguesa [16]. Relembra-se que esta comparação está a considerar apenas 13,4% das necessidades de aquecimento inicialmente indicadas pelo método sazonal.

Tabela 4.6. Coeficientes de transmissão térmica de referência para elementos opacos, U_{ref} [W/(m².°C)].

Componente		Zona climática		
		987 GD	1570 GD	1924 GD
Cobertura	$U_{ótimo}$	0,49	0,49	0,39
	$U_{ref}^{(1)}$	0,40	0,35	0,30
	$U_{ref}^{(2)}$	0,35	0,30	0,25
Paredes	$U_{ótimo}$	0,62	0,62	0,37
	$U_{ref}^{(1)}$	0,50	0,40	0,35
	$U_{ref}^{(2)}$	0,40	0,35	0,30
Pavimento	$U_{ótimo}$	0,58	0,58	0,58
	$U_{ref}^{(1)}$	0,40	0,35	0,30
	$U_{ref}^{(2)}$	0,35	0,30	0,25

⁽¹⁾ Em vigor até 31/12/2015; ⁽²⁾ Em vigor após 31/12/2015 (ver também o *Anexo III – Quadro dos edifícios existentes – requisitos aplicáveis*).

a)



b)

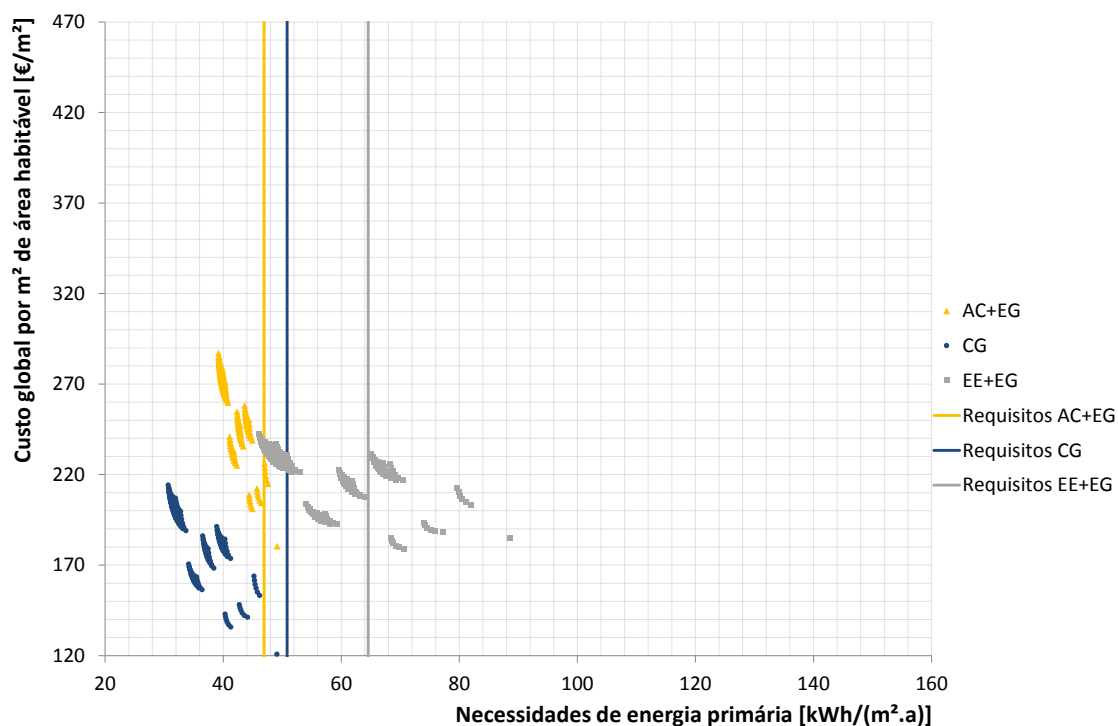


Figura 4.5. Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira e para o limite inferior do custo do isolamento: a) edifício localizado na zona climática com 1924 GD; b) edifício localizado na zona climática com 987 GD.

4.1.3.1.3 Análise de sensibilidade

Nesta seção, são estudados os impactos das variações das necessidades de energia útil, dos preços de energia e das taxas de desconto.

O objetivo é avaliar o impacto da flutuação destes três parâmetros na rentabilidade, verificando em simultâneo o cumprimento dos atuais requisitos mínimos regulamentares e se os pacotes de medidas se apresentam mais rentáveis que o cenário de referência.

Na Figura 4.6 são visíveis as diferenças nos resultados para dois cenários de consumo de energia primária.

Um dos gráficos mostra o custo global dos diferentes pacotes admitindo que se consome energia para fazer face apenas a 13,4% das necessidades útil enquanto no segundo caso se considera 100% do consumo de energia estimado pelo método sazonal.

Nesta Figura, é possível visualizar os resultados nas perspetivas financeira e macroeconómica.

A rentabilidade dos pacotes está dependente do efetivo consumo de energia.

Por este motivo, nos estudos de rentabilidade económica deverá avaliar-se se o método de estimativa das necessidades energéticas é ajustado aos reais consumos de energia.

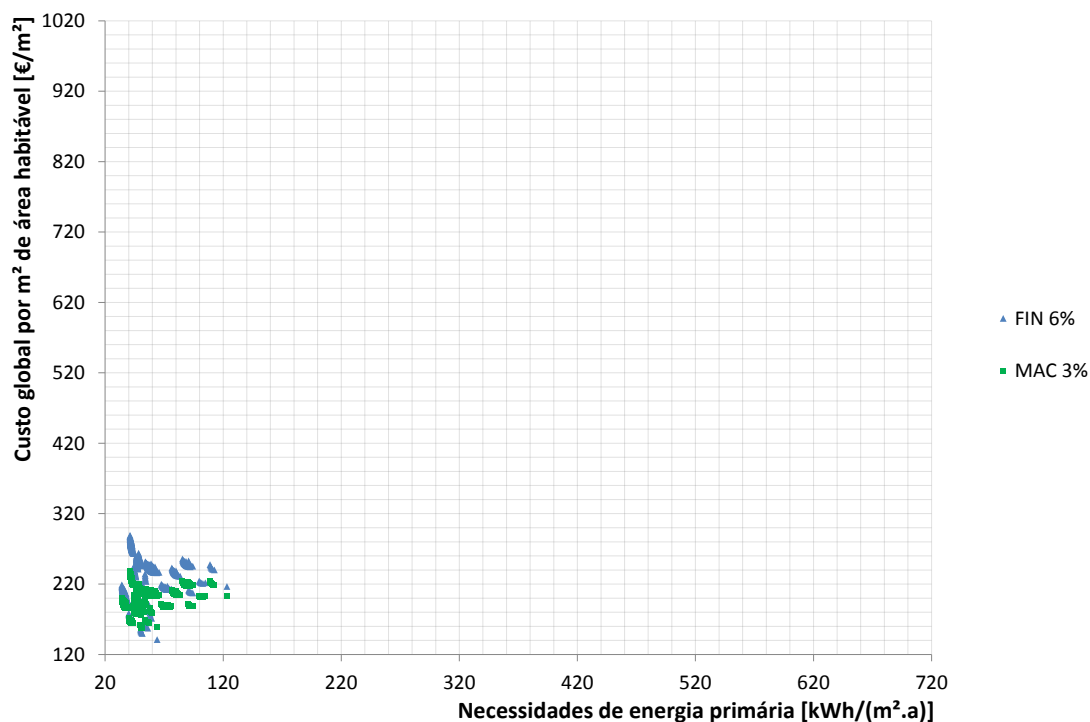
É importante observar a posição relativa dos pacotes em ambas as perspetivas.

Os mesmos pacotes podem ser identificados traçando-se uma linha vertical, uma vez que o consumo de energia primária é exatamente o mesmo, nas duas perspetivas.

Assim, notam-se diferenças, na medida em que caminhamos em direção às soluções mais intensivas no consumo de energia primária.

Este comportamento deve-se à relevante participação dos custos de energia no custo global, além do impacto dos impostos e encargos sobre os preços da eletricidade (para AC e EE) na perspetiva financeira, na ordem de 105%, cujos motivos já foram detalhados anteriormente ([125], [126]).

a)



b)

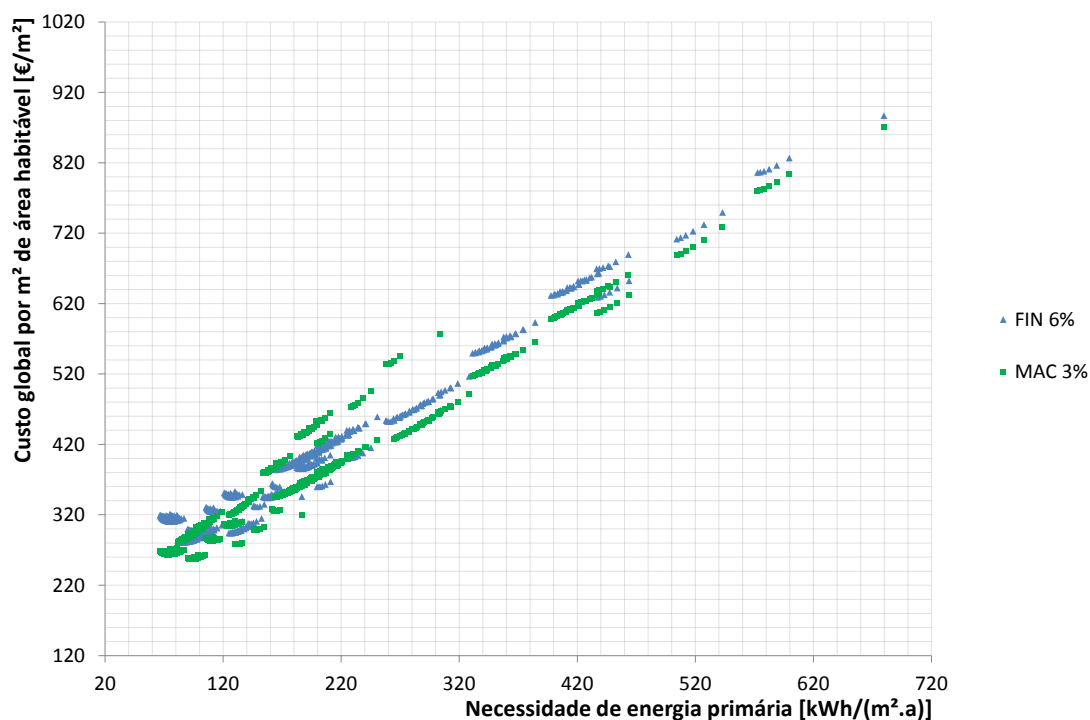


Figura 4.6. Custo global e necessidades de energia primária, nas perspetivas financeira e macroeconómica, para o limite inferior do custo do isolamento e todos os sistemas, na zona climática com 1570 GD: a) resultados para 13,4% das necessidades nominais de energia útil para aquecimento; b) resultados para 100% das necessidades nominais de energia útil para aquecimento.

A título de exemplo, para os 1570 GD e sem aplicar o fator de redução de consumos, a solução ótima identificada nos resultados corresponde ao sistema CG, a aplicar 100mm de isolamento na cobertura, 80mm nas paredes e sem isolamento no pavimento.

A esta solução corresponde um gasto de € 63 mensais em energia para aquecimento e preparação de AQS.

Considerando o fator de redução de 13,4%, esta mesma solução corresponderia a um gasto de € 31 mensais em energia para aquecimento e preparação de AQS, quantia esta muito mais próxima dos valores habitualmente praticados em Portugal (um gasto total médio com energia de € 70 por mês [17]).

Esta diferenciação de custos com consumo de energia é ainda mais notória quando se compara com os valores do edifício de referência, sem qualquer intervenção, conforme se pode observar na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Comparação dos custos mensais com consumo de energia para diferentes cenários.

<i>Necessidades de energia útil</i>		<i>Cenário de referência</i>			<i>Cenário com rentabilidade ótima</i>		
		kWh/ano	kWh/mês	€/mês	kWh/ano	kWh/mês	€/mês
100%	$E_{h,k}$	20562	1714	435	1866	155	63
100%	$E_{w,k}$	2972	248		2972	248	
13,4%	$E_{h,k}$	2755	230	80	250	21	31
100%	$E_{w,k}$	2972	248		2972	248	

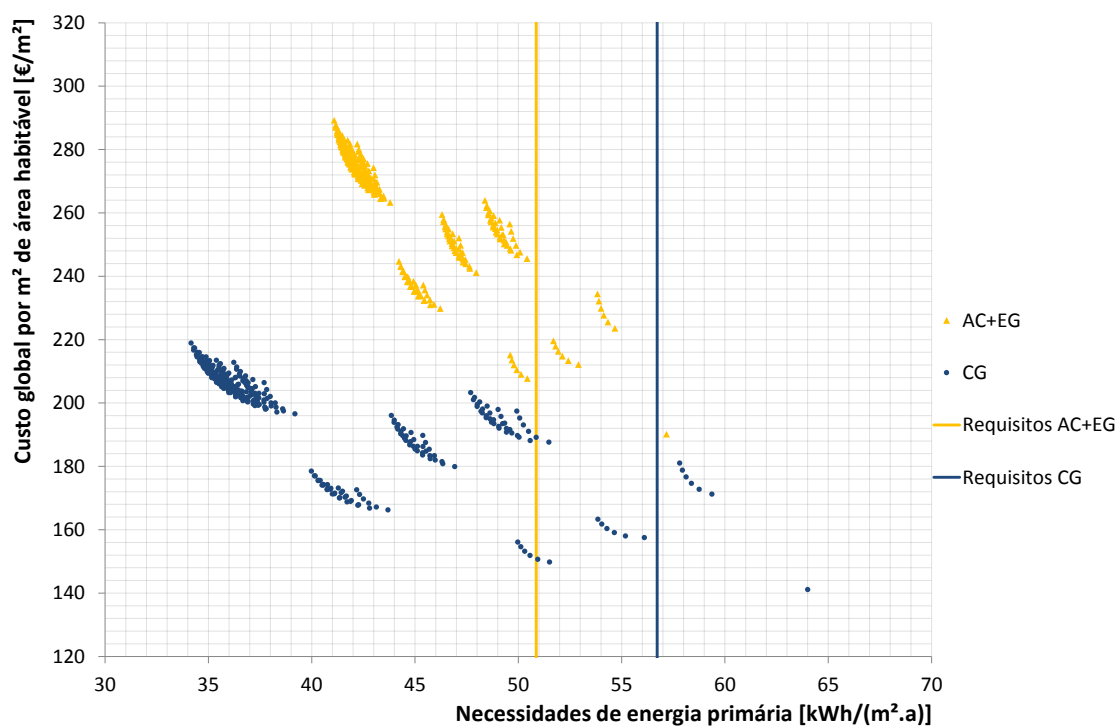
Na Figura 4.7, apresentam-se dois cenários de evolução de preços de energia.

O primeiro representa as estimativas fornecidas pelo Eurostat (Figura 4.7-a) e o segundo mostra um cenário hipotético de evolução linear dos preços de energia em 2,5% (Figura 4.7-b).

Pode-se observar que a mudança no cenário de evolução dos preços de energia somente altera o custo global, não alterando a posição relativa dos pacotes de rentabilidade ótima de ambas as opções de sistema.

No entanto, o percentual de participação do custo com consumo de energia no custo global, sobe de 58,85% (Eurostat) para 64,05% (para um aumento linear de 2,5%), na perspetiva macroeconómica, o que pode incentivar o investimento em reabilitação energética.

a)



b)

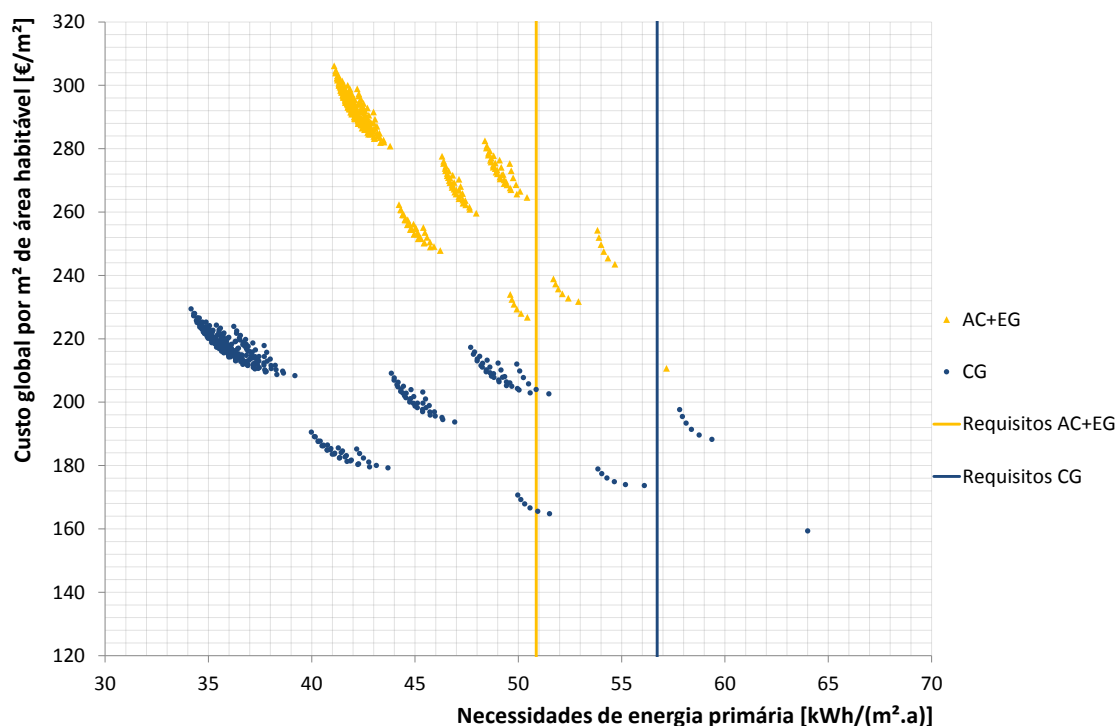


Figura 4.7. Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira, para o limite inferior do custo do isolamento e a zona climática com 1570 GD, sistemas CG e AC+EG: a) cenário de evolução dos preços de energia Eurostat; b) cenário de evolução linear dos preços de energia em 2,5%.

Como foi utilizada como referência a taxa de desconto de 6% para a perspetiva financeira, representando linhas de financiamento especialmente dedicadas a projetos de reabilitação, em Portugal [129], optou-se por realizar a análise de sensibilidade com uma taxa de 12%.

Também foi analisado o aumento de 3 para 6% na taxa de desconto da perspetiva macroeconómica.

Na Figura 4.8, pode-se verificar o comportamento dos pacotes de medidas anteriormente considerados de rentabilidade ótima, quando submetidos a taxas de desconto maiores.

Os níveis de rentabilidade na perspetiva financeira e na macroeconómica apresentam mudanças substanciais.

Os custos de energia, significativamente mais elevados na perspetiva financeira, nomeadamente devido a impostos e taxas, principalmente no caso da eletricidade, podem de alguma forma promover investimentos em reabilitação energética na perspetiva do investidor, porque há maiores garantias de retorno deste investimento.

Por outro lado, o aumento do custo de capital, pode inviabilizar investimentos avultados e, por conseguinte, a adoção de muitos dos pacotes.

Para se ter uma ordem de grandeza, no cenário com perspetiva financeira em 6% (Figura 4.8-a), a participação dos custos de investimento no custo global do pacote de rentabilidade ótima é de 41%.

No cenário com perspetiva financeira em 12% (Figura 4.8-b), a participação dos custos de investimento no custo global do pacote de rentabilidade ótima é de 56%.

Em relação aos custos decorrentes das emissões de gases com efeito estufa, no cenário com perspetiva macroeconómica em 3% (Figura 4.8-a), a sua participação no custo global do pacote de rentabilidade ótima é de 6,26%.

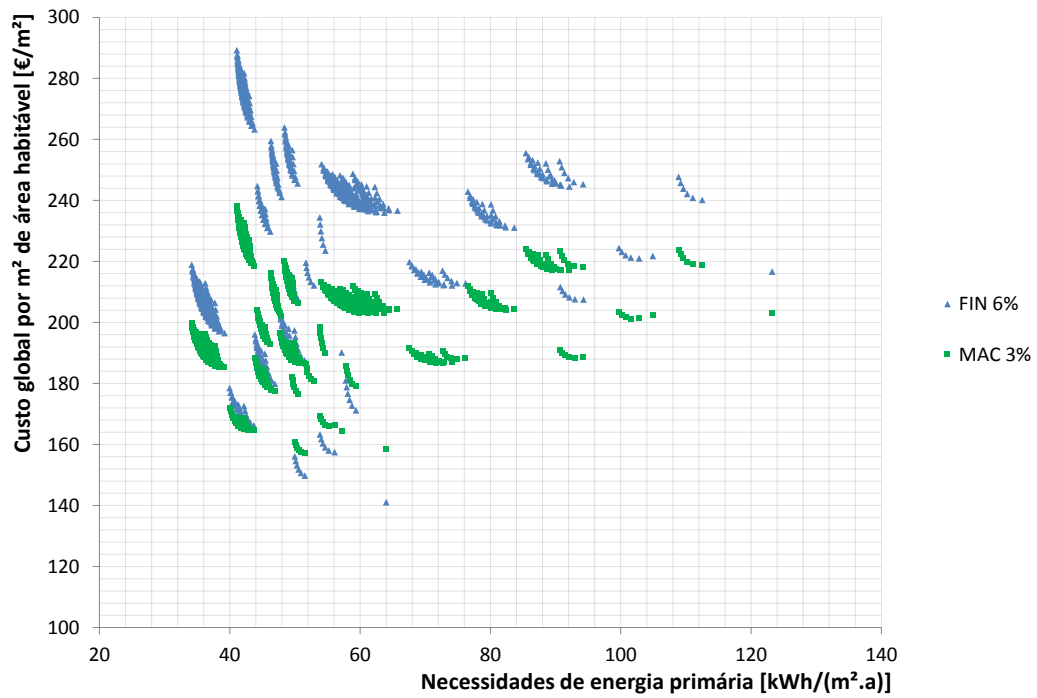
No cenário com perspetiva macroeconómica em 6% (Figura 4.7-b), a participação dos chamados custos de carbono no custo global do pacote de rentabilidade ótima é de 7,47%.

Os cálculos nas perspetivas financeira e macroeconómica tendem a eleger o mesmo pacote de rentabilidade ótima.

Em alguns casos, o custo global de um pacote na perspetiva macroeconómica chega a ultrapassar o custo global do mesmo pacote na perspetiva financeira, considerando as taxas de desconto escolhidas para este estudo.

Deste modo, considera-se que os custos de carbono atualmente estabelecidos, podem ser demasiado baixos para influenciar significativamente os níveis de ótimos de rentabilidade.

a)



b)

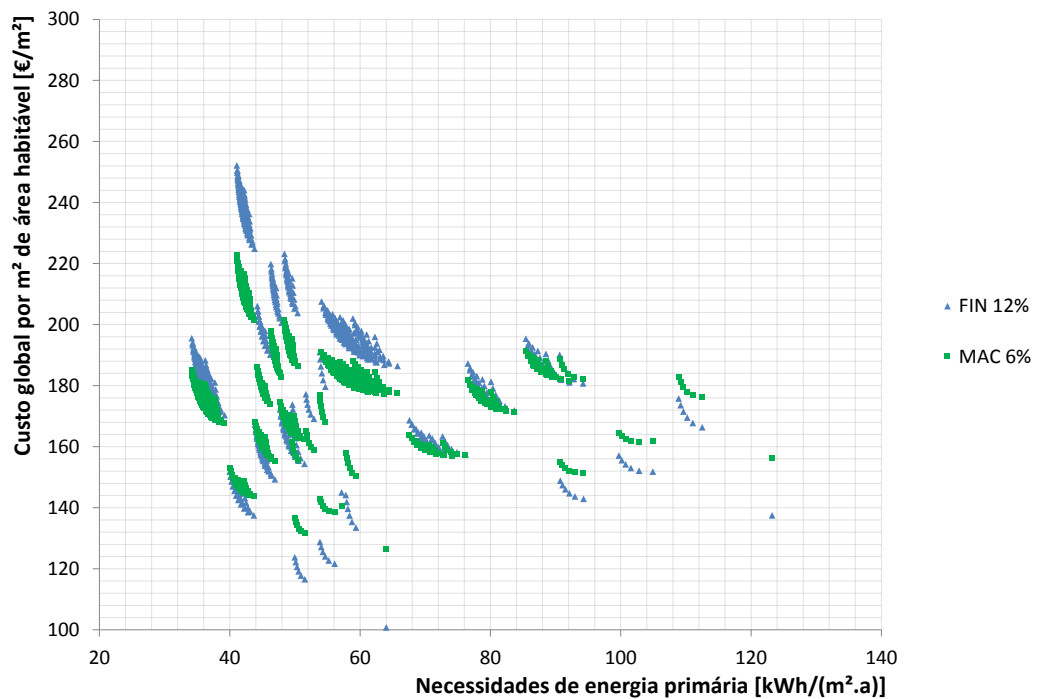


Figura 4.8. Custo global e necessidades de energia primária, nas perspetivas financeira e macroeconómica, para o limite inferior do custo do isolamento e zona climática com 1570 GD: a) taxas de desconto de 6% (FIN) e 3% (MAC); b) taxas de desconto de 12% (FIN) e 6% (MAC).

4.1.3.2 Resultados do AGe³

Até este ponto, os resultados analisados foram calculados pelo Sistema de Eficiência Energética em Edifícios ($\$e^3$) para uma avaliação paramétrica que resultou em **4.116** pacotes de reabilitação energética para cada localidade. A seguir, é avaliada uma quantidade muito maior de combinações. Inicialmente, são consideradas alternativas de isolamento térmico (incluindo a opção sem isolamento) para a cobertura (10), paredes exteriores (10) e pavimento (10), opções de janelas (11) e a utilização de diferentes sistemas para aquecimento da área habitável e preparação de AQS (4). Assim, a avaliação paramétrica resulta agora em **44.000** pacotes de reabilitação energética. Visando a apresentação gráfica de todos estes pacotes, a rentabilidade das medidas é calculada pelo módulo de “força bruta” do Algoritmo Genético para Eficiência Energética em Edifícios (AGe³).

Com este procedimento, é possível identificar a fronteira ótima de Pareto do problema tratado neste caso de estudo e compará-la com os resultados que foram produzidos pelo $\$e^3$ a partir da seleção anterior de soluções. O objetivo desta ação é verificar se as soluções selecionadas permanecem como as mais promissoras, mesmo com a incorporação de novas opções para reabilitação energética. Visa também avaliar se os resultados obtidos pelos dois programas convergem e são consistentes, ao mesmo tempo em que sinaliza se a AES foi eficaz.

Nas medidas para a melhoria da envolvente, os valores originais de transmissão térmica U para a cobertura, paredes e pavimento são reduzidos por intermédio de isolamento térmico em poliestireno expandido (EPS) em espessuras que variam entre 30 e 180mm. O sistema de aplicação e os respetivos custos associados permanecem os mesmos utilizados na simulação anterior. Na Tabela 4.8, são apresentadas as várias soluções consideradas para cada uma das partes da envolvente opaca, as quais foram combinadas entre si.

Tabela 4.8. Espessuras de isolamento térmico e coeficientes de transmissão térmica das soluções de cobertura, paredes e pavimento.

<i>Cobertura</i>		<i>Paredes</i>		<i>Pavimento</i>	
<i>e [mm]</i>	<i>U [W/(m².°C)]</i>	<i>e [mm]</i>	<i>U [W/(m².°C)]</i>	<i>e [mm]</i>	<i>U [W/(m².°C)]</i>
0	2,80	0	2,00	0	1,65
30	0,84	30	0,75	30	0,70
40	0,68	40	0,62	40	0,58
60	0,49	60	0,46	60	0,44
80	0,39	80	0,37	80	0,35
100	0,32	100	0,31	100	0,30
120	0,27	120	0,26	120	0,25
140	0,24	140	0,23	140	0,22
160	0,21	160	0,20	160	0,20
180	0,19	180	0,18	180	0,18

A janela característica do edifício de referência, a qual apresenta vidro simples com fator solar de 0,85, caixilharia de madeira e coeficiente de transmissão térmica de 5,1 [W/(m².°C)], foi substituída por várias opções de janela em PVC, conforme é apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Coeficientes de transmissão térmica e fatores solares das opções de janelas

<i>Janelas</i>	
<i>U [W/(m².°C)]</i>	<i>Fator Solar</i>
	<i>g_w</i>
5,10	0,85
2,45	0,59
2,39	0,48
2,37	0,59
2,25	0,58
2,08	0,59
2,07	0,47
2,07	0,30
1,87	0,58
1,80	0,47
1,21	0,36

No que se refere aos sistemas, além do Emissor Elétrico (EE), já presente no edifício de referência, no cenário de reabilitação energética foi considerada a substituição deste por Ar Condicionado (AC), Caldeira a Gás (CG) e Caldeira a Biomassa (CB) que, embora não seja adequada a este edifício, será estudada para fins de comparação de rentabilidade.

Note-se que a Caldeira a Gás e a Caldeira a Biomassa não necessitam de sistema adicional para preparação de AQS por serem capazes de executar as duas funções, conforme Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados.

<i>h,k</i>	<i>Sistema de Aquecimento</i>			<i>w,k</i>	<i>Sistema de preparação de AQS</i>		
	<i>Equipamento</i>	<i>Combustível</i>	<i>Eficiência</i>		<i>Equipamento</i>	<i>Combustível</i>	<i>Eficiência</i>
<i>h,1</i>	Emissor Elétrico	Eletricidade	1,00	<i>w,1</i>	Esquentador a Gás	Gás	0,60
<i>h,2</i>	Ar Condicionado	Eletricidade	4,30	<i>w,2</i>	Esquentador a Gás	Gás	0,78
<i>h,3</i>	Caldeira a Gás	Gás	0,93	<i>w,3</i>	Caldeira a Gás	Gás	0,83
<i>h,4</i>	Caldeira a Biomassa	<i>Pellets</i>	0,92	<i>w,4</i>	Caldeira a Biomassa	<i>Pellets</i>	0,92

Nota: *h,k* identifica cada sistema de aquecimento e *w,k* identifica cada sistema de preparação de AQS, onde *h,1* combina somente com *w,1* e assim por diante.

Tendo em vista já ter sido estudada a influência dos dados climáticos e dos custos de intervenção, além da variação das necessidades de energia útil, dos preços de energia e da

denominada taxa de desconto, a análise dos resultados a seguir se concentra em outros aspetos. Selecionou-se a zona climática com 1570 GD, a qual representa características predominantes da região central de Portugal. As medidas de eficiência energética foram simuladas considerando-se o limite inferior do custo do isolamento, fator de redução de 13,4% para as necessidades de energia útil, preços de energia no cenário proposto pelo Eurostat [58] e taxa de 6%, na perspetiva financeira.

Além do Valor Atualizado Líquido (VAL) requerido no Regulamento Delegado n.º 244 [10], quatro critérios de decisão são calculados: período de recuperação simples e atualizado, taxa interna de retorno sobre o investimento (TIR) e retorno sobre o investimento (ROI). A Figura 4.9 apresenta as **44.000** combinações calculadas pelo AGe³.

O gráfico mostra a distribuição das soluções no espaço de busca dos objetivos (redução do custo global e das necessidades de energia primária), sendo possível observar a mesma lógica de agrupamentos que foi detetada na simulação pelo \$e³. Estes agrupamentos são associados aos sistemas utilizados para aquecimento da área habitável e preparação de AQS (AC+EG, CG e EE+EG).

Todos os pacotes que incluem Caldeira a Biomassa - CB aparecem concentrados e no eixo $PE = 0$ devido a 100% das necessidades de energia primária serem atendidas por energia renovável produzida por *pellets*, considerados neutros em emissões de CO₂ ($GHG_{i,j} = 0$), durante seu ciclo de vida.

Nota-se que este gráfico apresenta ligeiras diferenças em relação à simulação produzida pelo \$e³. Visando a simplificação dos cálculos, a totalização do custo global realizada pelo AGe³ é um pouco menor, pois considera um valor fixo em euros por quilowatt-hora [€/kWh], para diferentes gamas de necessidades de energia final, enquanto o \$e³ é mais preciso, pois recorre a tabelas dinâmicas que consideram uma diluição de taxas fixas presentes nas faturas de consumo, quando as necessidades de energia são maiores.

No entanto, comparando-se o custo global do pacote de rentabilidade ótima, no \$e³ e no AGe³, esta diferença é inferior a 4,5%. Outra diferença em relação à simulação produzida pelo \$e³ é que o Esquentador de Água a Gás – EG que é combinado com o Ar Condicionado – AC tem eficiência maior (ver Tabela 4.9) do que no cenário simulado pelo \$e³ ($\eta_{w,k} = 0,78$ versus $\eta_{w,k} = 0,60$), o que melhora ligeiramente o desempenho do conjunto AC+EG, notadamente em termos de necessidades de energia primária.

Cumprе salientar que estas ligeiras diferenças não alteram a disposição das curvas, tão pouco alteram os níveis ótimos de rentabilidade, dentro do conjunto de combinações associadas a cada sistema. Por exemplo, o melhor pacote continua sendo o que contém o sistema CG, com isolamento de 60mm somente na cobertura e sem alteração de janelas ($PE = 52$ [kWh/m².a]; $GC = 143$ [€/m²]), uma vez que a opção CG sem qualquer tipo de isolamento e sem alteração

de janelas não cumpre os requisitos mínimos, embora apresente o menor custo global ($PE = 64$ [kWh/m².a]; $GC = 133$ [€/m²]).

Note-se que a substituição de janelas não é rentável, em ambas as simulações. No entanto, caso se concretize a decisão de substituição, a janela nova mais rentável é a que apresenta fator solar de 0,58 e coeficiente de transmissão térmica de 1,87 [W/(m².°C)], em ambas as simulações. A comparação dos resultados obtidos através da aplicação do método proposto no capítulo 3, sejam eles calculados pelo Se³ ou pelo AGe³, e da Figura 4.9 (AGe³; 44.000 combinações) com a Figura 4.3-b (Se³; 4.116 combinações) permite afirmar que os resultados, são consistentes e a AES é eficaz.

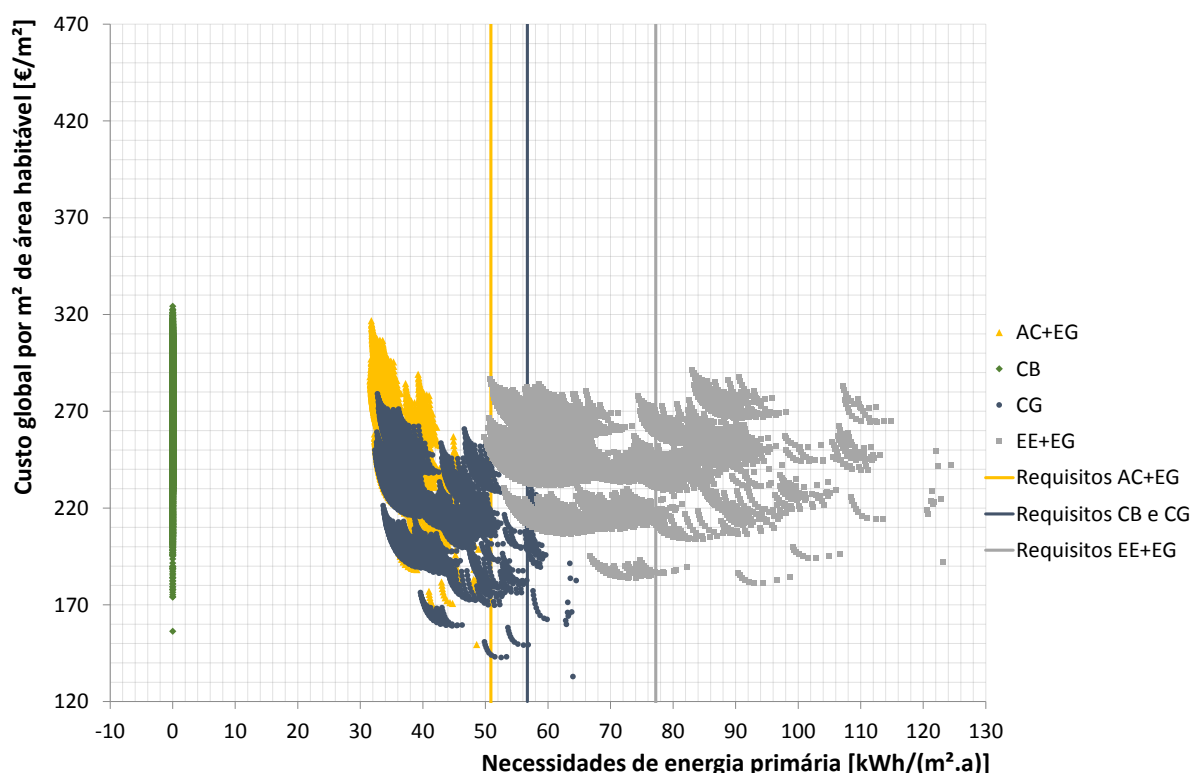


Figura 4.9. Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.

4.1.3.2.1 Rentabilidade dos sistemas baseados em FER

Dando sequência ao estudo de medidas de eficiência energética pelo AGe³, considerando diferentes espessuras de isolamento, substituição de janelas e sistemas convencionais para aquecimento e preparação de AQS, é avaliada a influência da incorporação de sistemas baseados em FER nas combinações já existentes.

Concentra-se os estudos na localidade com 1570 GD, a qual conta com boa exposição solar, favorecendo o desempenho dos painéis fotovoltaicos e sistemas solares térmicos. Assume-se que, se estas soluções não se viabilizam economicamente nesta região, dificilmente alcançam a condição de rentabilidade ótima em zonas climáticas com menor incidência de radiação solar.

Para além da Caldeira a Biomassa (CB), cujas características foram demonstradas na Tabela 4.9, são considerados como sistemas FER o Painel Fotovoltaico (PV), o sistema Solar Térmico com Termossifão (ST T) e o sistema Solar Térmico de Circulação Forçada (ST C), combinados com os pacotes obtidos nas etapas anteriores do presente caso de estudo.

É analisado o contributo do PV e dos sistemas de energia solar térmica, individualmente e sem qualquer combinação entre sistemas FER, a não ser com a Caldeira a Biomassa.

O PV foi dimensionado com um sistema de armazenamento de energia com baterias, para utilização em regime de autoconsumo, previsto na regulamentação portuguesa [45].

Na Tabela 4.11, são apresentados os sistemas baseados em FER.

Tabela 4.11. Sistemas baseados em fontes de energia renováveis (FER).

r,k	Sistema FER	Fonte de energia	Energia produzida	Eficiência
$r,1$	Solar Térmico de Termossifão	Solar	Térmica	1,00
$r,2$	Solar Térmico de Circulação Forçada	Solar	Térmica	1,00
$r,3$	Painel Fotovoltaico	Solar	Eletricidade	1,00

Nota: r,k identifica cada sistema FER. Não foi considerada qualquer combinação entre estes sistemas.

A Caldeira a Biomassa é dimensionada para produzir todas as necessidades de aquecimento da área habitável e preparação de AQS. Na Tabela 4.12, são apresentadas as contribuições de FER nos pacotes onde estão inseridas.

Tabela 4.12. Energia produzida pelos sistemas FER ($E_{r,k}$), em [kWh/(m².a)]

Sistema FER	Aquecimento	AQS	Eletricidade
*Caldeira a Biomassa	100%	100%	---
Solar Térmico de Termossifão	---	16,08	---
Solar Térmico de Circulação Forçada	---	15,00	---
Painel Fotovoltaico	---	---	67,74

Nota: A Caldeira a Biomassa produz 100% das necessidades de energia para aquecimento e preparação de AQS, após subtração das eventuais contribuições de outros sistemas FER, conforme a composição de cada pacote de medidas.

Visando um melhor aproveitamento da eletricidade produzida pelo PV, este sistema FER foi apenas combinado com os sistemas convencionais que usam esta fonte de energia, ou seja, o AC e o EE.

Logo, nesta nova simulação, os pacotes de reabilitação energética combinaram opções de isolamento térmico para cobertura (10), paredes exteriores (10) e pavimento (10) substituição de janelas (11) e a utilização de diferentes sistemas de aquecimento e preparação de AQS (4), mais opções para FER (4), menos 22.000 combinações adversas (o PV não é combinado com CB ou CG), num total de **154.000** pacotes.

O aumento substancial na quantidade de pacotes justifica a utilização de ferramentas de otimização. A Figura 4.10 apresenta as soluções não-dominadas encontradas pelo AGe³, num ciclo de cálculo.

Note-se que o AGe³ foi capaz de identificar, para o problema abordado, uma grande quantidade de pacotes na fronteira ótima de Pareto.

O AGe³ também foi capaz de gerar a curva dos níveis ótimos de rentabilidade com precisão, atendendo ao que é exigido pelo Regulamento Delegado n.º 244 [10], com uma significativa redução no tempo de processamento em relação ao \$e³.

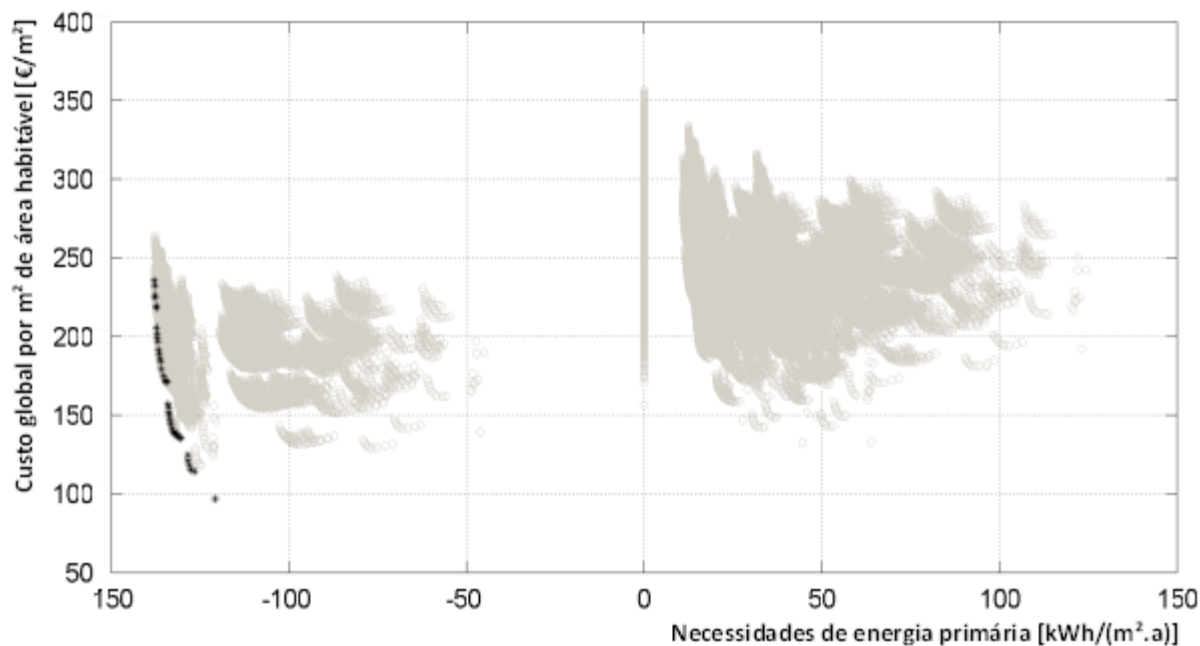


Figura 4.10. Custo global e necessidades de energia primária de 154.000 pacotes e soluções não dominadas obtidas através do algoritmo genético AGe³, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.

No entanto, os algoritmos genéticos são concebidos para encontrarem as soluções ótimas ou a fronteira ótima de Pareto, podendo dificultar uma análise mais abrangente do comportamento de cada um dos agrupamentos de soluções, neste caso claramente vinculados aos diferentes sistemas convencionais para aquecimento da área habitável.

Assim, os níveis ótimos de rentabilidade para todas as combinações na perspetiva financeira ($FIN = 6\%$), calculados pelo módulo de “força bruta” do AGe³, podem ser vistos em maior detalhe na Figura 4.11.

As linhas verticais mostram os requisitos mínimos em Portugal, de acordo com o sistema de aquecimento (AC - laranja, CB e CG - azul e EE - cinza).

Os resultados ilustram as curvas de rentabilidade para cada combinação de isolamento, janelas, utilização de diferentes sistemas de aquecimento e preparação de AQS, além de opções para FER.

O gráfico apresenta a distribuição das soluções, e é novamente possível notar-se grupos ou “nuvens” de pacotes ligados a determinados sistemas de aquecimento convencionais (AC, CB, CG e EE).

No quadrante negativo por exemplo, duas destas nuvens são grupos de pacotes que incorporam PV, combinado com dois sistemas convencionais diferentes: AC (nuvem à esquerda) e EE (à direita).

Os valores tornam-se negativos porque o PV produz mais energia do que consumido nas aplicações que estão no âmbito deste estudo (aquecimento da área habitável e preparação de AQS).

Supondo um consumo de eletricidade residencial médio, total e diário, em torno de 0,2 [kWh/m²], ou mensal de 6 [kWh/m²], o excedente de energia seria totalmente aproveitado por outras aplicações (iluminação, eletrodomésticos etc.), considerando o seu armazenamento em baterias.

A influência da incorporação de sistemas baseados em FER nas combinações já existentes pode ser melhor percebida na Figura 4.12, onde são demonstrados os níveis ótimos de rentabilidade para 110.000 pacotes que incluem renováveis.

Como visto anteriormente, todos os pacotes que incluem BM aparecem concentrados e apontando eixo $PE = 0$.

Ambos os sistemas solares térmicos, ST T e ST C, reduzem as necessidades de energia primária, como é esperado de sistemas FER, mas a solução com termossifão tem a vantagem de reduzir o custo global, exceto em combinação com CB (CB+ST T), sistema que usa os combustíveis de menor custo (*pellets*).

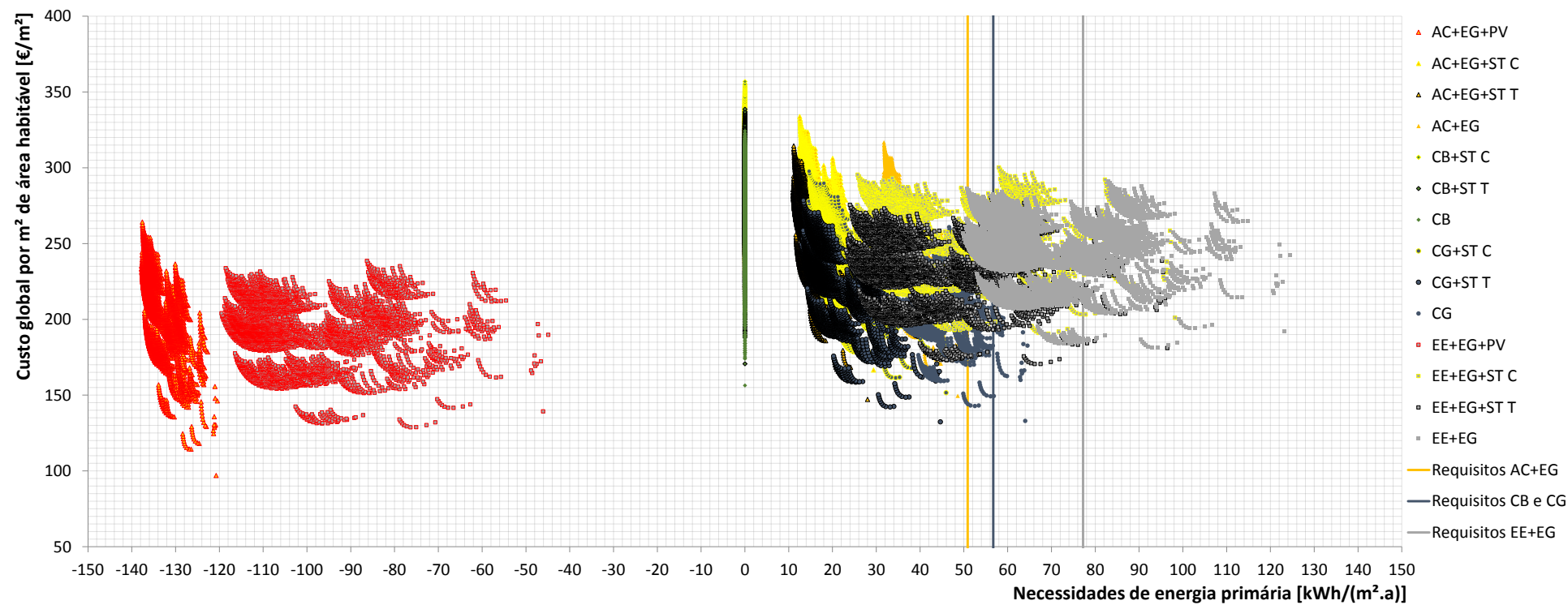


Figura 4.11. Custo global e necessidades de energia primária de 154.000 pacotes, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.

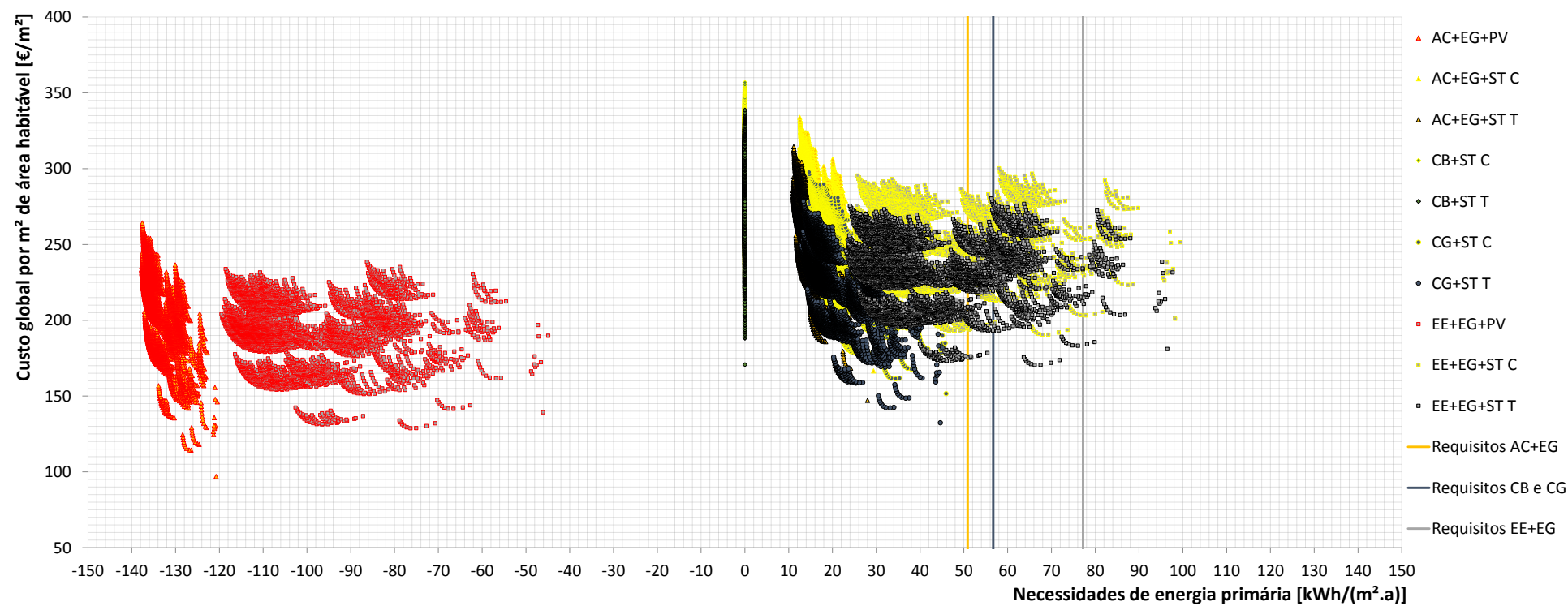


Figura 4.12. Custo global e necessidades de energia primária de 110.000 pacotes que incluem FER, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.

4.1.3.3 Perspetiva financeira na abordagem de retorno sobre o investimento

A fim de determinar as reais vantagens do investimento em reabilitação energética para investidores, a perspetiva financeira é analisada na abordagem de retorno sobre o investimento (ROI). Assim, o valor ajustado de investimento adicional em medidas, AI , é comparado com seu efeito no custo global, GC , e é também avaliado o ROI oferecido pelos pacotes de reabilitação energética disponíveis.

Como demonstrado no capítulo 3, AI consiste no valor total investido em medidas de eficiência energética e no uso de energias renováveis que superam os custos para manter o cenário BAU, ou seja, a diferença acrescida como investimento, propriamente dito.

Quando consideramos a perspetiva financeira do investidor, a situação muda significativamente, como demonstrado na Figura 4.13. Pacotes que incluem PV e que seriam considerados melhores opções, de acordo com a abordagem de rentabilidade recomendada pela Comissão Europeia, não são aceitáveis, de acordo com uma abordagem de ROI, devido ao alto investimento inicial necessário para este tipo de medida.

Uma vez que a taxa de desconto é significativamente maior do que as estimativas da evolução percentual dos preços da energia sugeridos pelo Eurostat [58], a potencial economia de custos de energia torna-se insuficiente para compensar o investimento inicial.

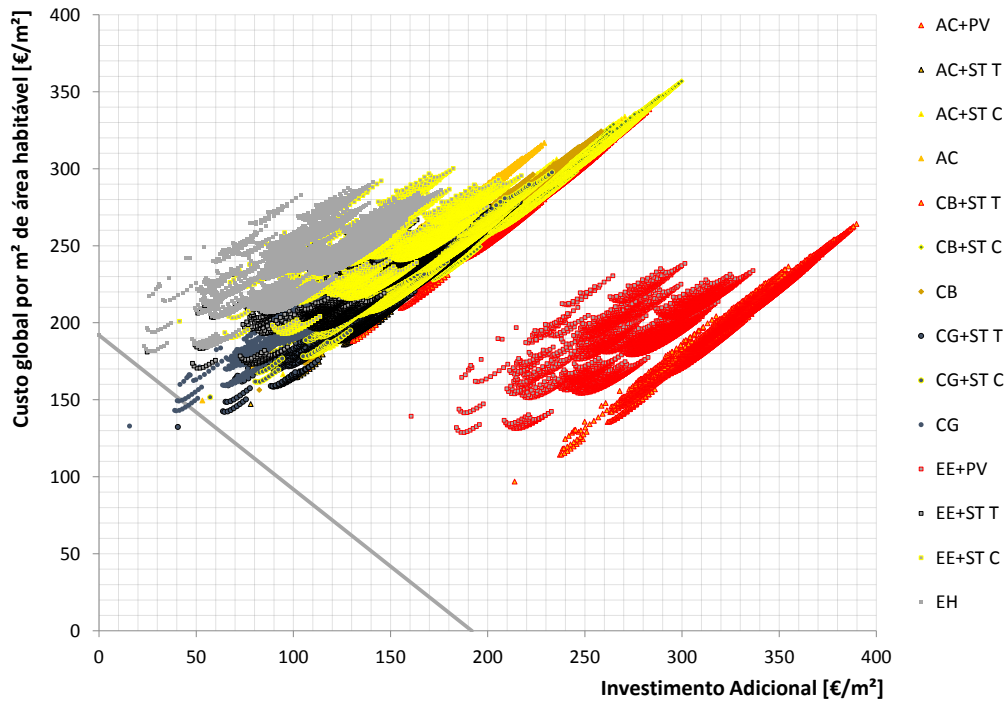
A Figura 4.13 inclui uma linha diagonal cinzenta que representa o custo global de um determinado pacote, acrescido do investimento adicional (montante investido a mais do que no cenário BAU), é igual ao custo global do cenário BAU adicionado dos custos de manutenção, substituição e valor residual de janelas e sistemas, já existentes no edifício de referência, durante o período de $\tau = 30$ anos.

Como o custo global e os investimentos adicionais são apresentados em Valor Atualizado Líquido (VAL), podemos comparar os pacotes usando esta linha cinzenta como referência. Apenas as soluções que estão dentro do triângulo formado por esta linha e os eixos horizontal x e vertical y oferecem ROI positivo e o investimento adicional não é maior do que o custo global no cenário BAU, quando se considera uma taxa de desconto de 6%.

Em pacotes que estão nesta linha, o investimento adicional não compensa a diminuição relativa no custo global, quando comparado com o cenário BAU. As soluções restantes (fora do triângulo) podem até mesmo reduzir o custo global (quando abaixo do custo global do cenário BAU, € 191,89), mas oferecem ROI negativo.

Neste tipo de análise, a taxa de desconto de 6% também pode ser entendida como custo de capital, especialmente quando o investidor não tem os recursos e precisa recorrer a linhas de crédito para realizar investimentos adicionais, em comparação com o cenário BAU.

a)



b)

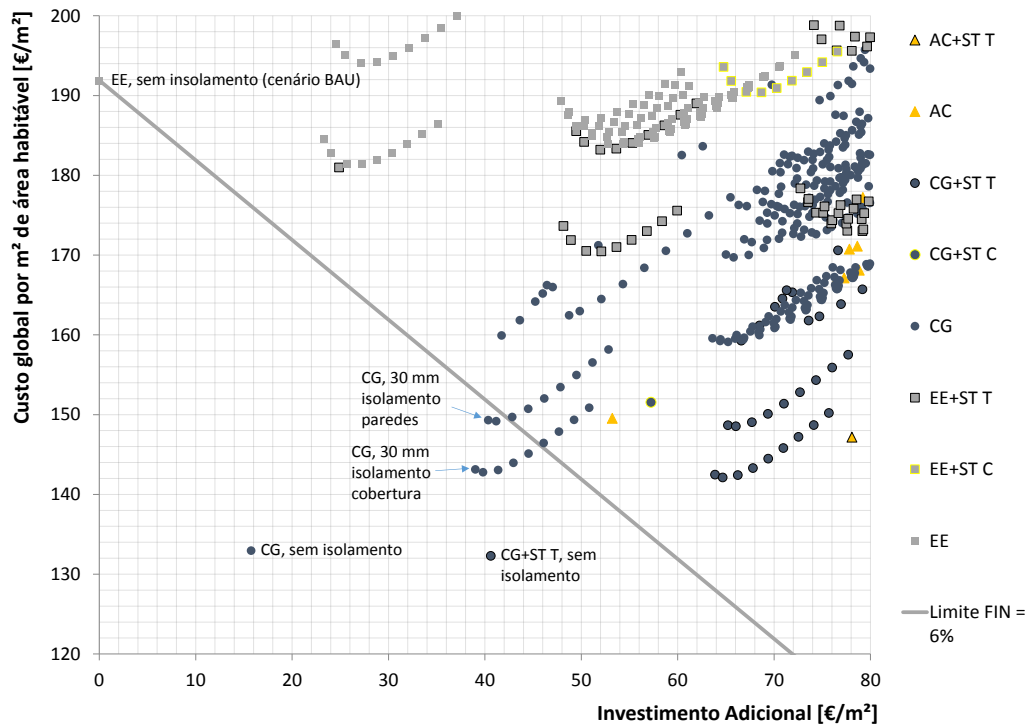


Figura 4.13. Custo global e investimento adicional de 154.000 pacotes, na perspectiva financeira na abordagem de ROI, para a zona climática com 1570 GD e considerando o limite inferior do custo do isolamento: a) total; b) detalhe dos pacotes até um custo global de 200 [€/m²] e um investimento adicional de 80 [€/m²].

Obviamente, esta análise se limita ao retorno sobre o investimento para os pacotes que fornecem as mesmas condições de conforto térmico, sem considerar outros benefícios que certas medidas de reabilitação energética podem proporcionar. Sobre este ponto, o interesse de cada investidor deve ser considerado na eleição do pacote de maior valor agregado, entre aqueles com maior retorno do que cenário BAU, bem como os requisitos mínimos a nível nacional. Por exemplo, podemos ver que a CG, sem isolamento ou qualquer outra medida, é a melhor pacote na perspectiva financeira do investidor, mas esta opção não cumpre os requisitos mínimos, como ilustra a Figura 4.11. Após a instalação do ST T, a opção CG (ainda sem isolamento) passa a atender os requisitos mínimos portugueses.

4.1.3.3.1 Análise das opções reais

A análise sob a ótica da teoria das opções reais permite uma abordagem do investimento sendo realizado em diferentes momentos do ciclo económico estudado (30 anos). Quando as medidas são implementadas individualmente e em momentos mais propícios, atribui-se um carácter dinâmico ao investimento.

Neste sentido, a substituição do sistema de preparação de AQS apresenta uma oportunidade de troca no final do ciclo de vida do equipamento existente. Quando se considera o isolamento, a melhor solução é a espessura de 30mm, só na cobertura. Neste edifício de referência, o isolamento da cobertura é mais rentável do que nos outros elementos, seguido do isolamento nas paredes. O isolamento do pavimento é o menos rentável devido ao aumento das dificuldades para a adoção desta medida em edifícios existentes. Em geral, neste edifício de referência como em outros, o investimento em isolamento torna-se mais efetivo quando as necessidades de energia úteis são mais elevadas ou o sistema de aquecimento apresenta baixa eficiência.

Na Tabela 4.13, a análise de 18 pacotes selecionados de medidas de eficiência, em comparação com o cenário de referência, permite-nos compreender o impacto de cada ação, isoladamente e em conjunto com outras. O pacote 0 representa o edifício de referência num cenário *business as usual* (BAU). Os elementos que são alterados, em comparação com o cenário BAU, estão em amarelo. Os valores que não atendem aos requisitos mínimos sobre as necessidades de energia primária, custo global ou ROI estão assinalados a laranja. Da mesma forma, os valores sublinhados a azul representam a melhor opção dentro destas mesmas colunas.

Destacam-se os pacotes 12, menores necessidades de energia primária, 13, menor custo global, e 14, ROI mais elevado (tendo em conta os requisitos mínimos para as necessidades de energia primária), de todas as 154.000 combinações. Os pacotes 1 a 4 consistem em apenas isolar componentes da envolvente opaca com placas de EPS, em espessuras que variam de 60 a 80mm. O pacote 5 contempla apenas a substituição de janelas. Os pacotes 6 a 11 consistem em substituir sistemas ou instalar sistemas FER. Ou seja, pacotes 1 a 11 representam medidas individuais, destacando-se o seu impacto sobre as necessidades de energia primária, o custo global e ROI.

Os pacotes 12 a 18 representam medidas combinadas e é possível ver a interação entre elas. A comparação entre esses pacotes confirma que a substituição do sistema de aquecimento é muito mais rentável do que a melhoria do isolamento na envolvente opaca, de acordo com o critério económico ROI.

Enquanto o pacote 14 é a melhor opção, o pacote 12 ocupa a 26.123ª posição no *ranking* do ROI. Isto comprova que nem sempre as economias de energia primária proporcionadas pela melhoria do isolamento térmico se traduzem em custos globais menores.

O pacote 14 proporciona um ROI de 47%, uma TIR de 15,47% (taxa interna de retorno sobre o investimento), um período de recuperação simples de 6 anos e um período de recuperação atualizado de 7 anos. O pacote 8 oferece o maior ROI ao longo dos 30 anos, mas não está em conformidade com a regulamentação.

Ressalta-se que o pacote 14 só pode ser adotado porque a envolvente do edifício não está submetida a uma grande renovação, dado que a regulamentação em vigor [16] estabelece requisitos mínimos para os valores de transmitância térmica na envolvente que devem ser considerados, se fosse o caso.

Esta análise mostra a importância de se avaliar o retorno do investimento numa perspectiva de longo prazo e também mostra que a abordagem de níveis ótimos de rentabilidade, recomendada pela Comissão Europeia, não é suficiente para fornecer a informação exigida pelos investidores.

Tabela 4.13. Cenário BAU (pacote 0) e 18 pacotes selecionados.

Pacote	Isolamento			Envidraçados		Sistemas		FER	Energia Primária	Custo Global FIN = 6%	ROI FIN = 6%
	Cobertura e [mm]	Paredes e [mm]	Pavimento e [mm]	Janelas U [W/m ² .°C]	Vidros g _w	Aquecimento Equipamento	AQS Equipamento				
0	-	-	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	-	123	192	-
1	60	-	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	-	94	181	-59%
2	-	60	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	-	103	194	-108%
3	-	-	80	5,10	0,85	EE	EG 0,60	-	110	216	-163%
4	60	60	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	-	74	184	-85%
5	-	-	-	1,87	0,58	EE	EG 0,60	-	121	219	-197%
6	-	-	-	5,10	0,85	AC	EG 0,78	-	49	150	-20%
7	-	-	-	5,10	0,85	CB	CB	-	-	156	-57%
8	-	-	-	5,10	0,85	CG	CG	-	64	133	275%
9	-	-	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	ST T	96	181	-56%
10	-	-	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	ST C	98	201	-122%
11	-	-	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	PV	46	139	-67%
12	180	180	180	1,87	0,58	AC	EG 0,78	PV	138	235	-112%
13	-	-	-	5,10	0,85	AC	EG 0,78	PV	121	97	-56%
14	-	-	-	5,10	0,85	CG	CG	ST T	45	132	47%
15	60	-	-	5,10	0,85	CG	CG	-	52	143	18%
16	30	-	-	5,10	0,85	CG	CG	-	53	143	25%
17	-	30	-	5,10	0,85	CG	CG	-	57	149	6%
18	-	-	30	5,10	0,85	CG	CG	-	60	162	-40%

A Figura 4.14 mostra o gráfico de rentabilidade para os pacotes selecionados e limites regulatórios a serem cumpridos para as necessidades de energia primária, dependendo do sistema utilizado para aquecimento.

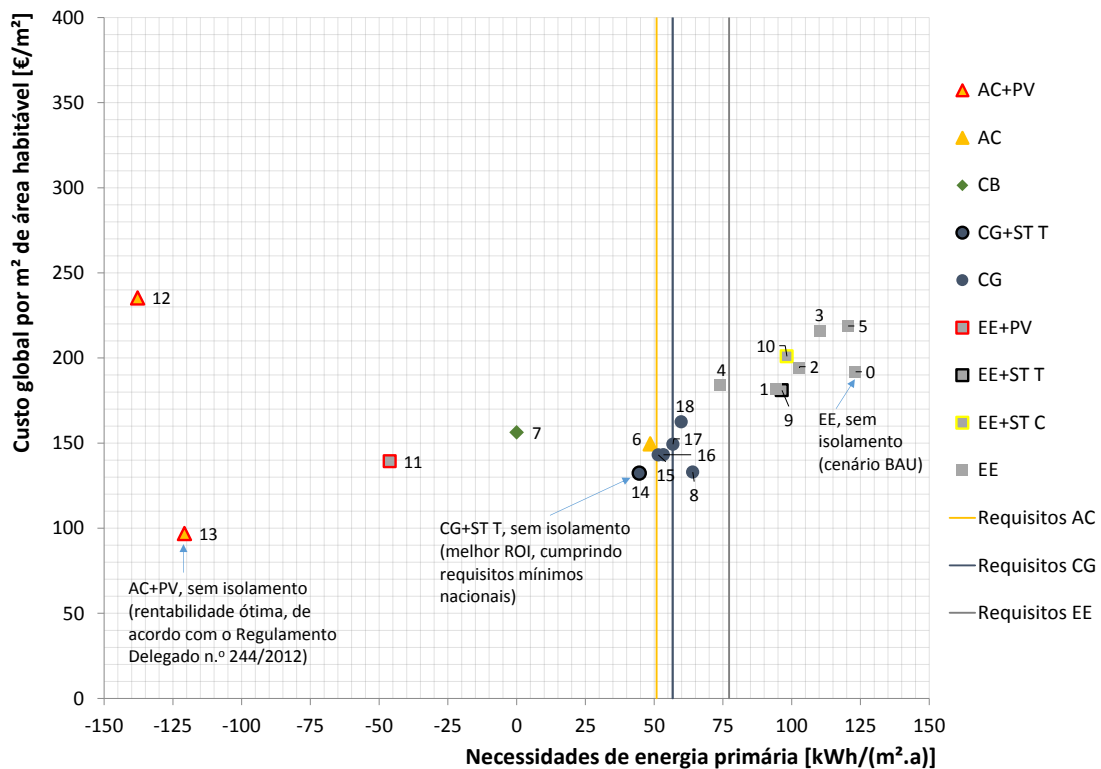


Figura 4.14. Custo global e necessidades de energia primária de 18 pacotes selecionados e cenário BAU, na perspectiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.

Para este edifício de referência e usando o sistema EE, o limite regulamentar de necessidades de energia primária é de 77,23 [kWh/(m².a)]. Para o sistema AC, o limite é de 50,87 [kWh/(m².a)] e de 56,72 [kWh/(m².a)] para CG e CB. Assim, podemos ver que o cenário BAU referência (pacote 0) e pacotes de 1 a 3, 5, 8 a 10 e 17 a 18 não cumprem a regulamentação portuguesa.

A Figura 4.15 mostra o gráfico do investimento adicional para os pacotes selecionados e o limite onde o ROI é semelhante ao cenário BAU. Os pacotes de 1 a 7, 9 a 13 e 18 têm um desempenho económico pior do que o cenário BAU, apesar de pacotes 7 e 11 a 13 elevarem o edifício à condição nZEB (edifício com necessidades quase nulas de energia) [47].

Em relação às opções reais que estão disponíveis para os investidores, fica claro que a rentabilidade depende do sistema de aquecimento que é adotado. O investimento em sistemas com alta eficiência ou baixo fator de conversão de energia primária pode até mesmo permitir o diferimento do investimento em isolamento ou na substituição de janelas. O investimento na melhoria da envolvente representa um compromisso de capital por um período prolongado, devido aos longos ciclos de vida destes materiais. A Tabela 4.14 resume a análise das opções reais.

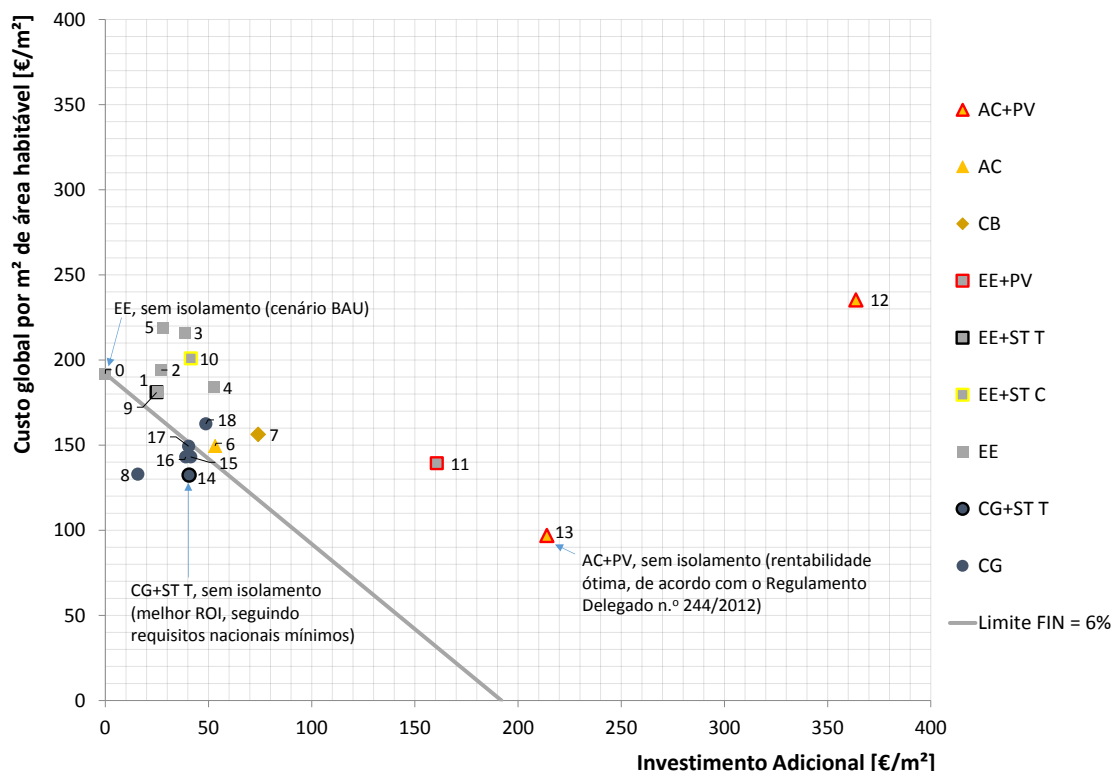


Figura 4.15. Custo global e investimento adicional de 18 pacotes selecionados e cenário BAU, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.

Tabela 4.14. Análise resumida das opções reais.

Medida: Investimento em	Ciclo de Vida [anos]	Contributo para o Custo Global [€/m²]	ROI do Investimento Adicional	Incerteza Técnica	Incerteza Económica	Risco	Opção
Painel Fotovoltaico (autoconsumo)	20	-53	-67%	Médio	Médio	↓	*Deferir
Solar Térmico de Termossifão	20	-11	-56%	Baixo	Baixo	↓	**Investir
Solar Térmico de Circulação Forçada	20	9	-122%	Baixo	Baixo	↓	Não investir
Ar Condicionado (aquecimento) e Esquentador de Água a Gás (AQS)	20	-42	-20%	Baixo	Baixo	↓	Não investir
Caldeira a Biomassa (aquecimento e AQS)	20	-36	-57%	Baixo	Baixo	↓	Não investir
Caldeira a Gás (aquecimento e AQS)	20	-59	275%	Baixo	Baixo	↓	**Investir
Novas Janelas	40	27	-197%	Médio	Baixo	↓	Não investir
Isolamento da Envolvente Opaca	50	↑	↑	Médio	Baixo	↓	Deferir

* Apesar de ainda ter um ROI negativo, o preço dos equipamentos tem caído rapidamente, determinando que esta opção de investimento tem de ser reavaliada periodicamente.

** Como demonstrado na Tabela 4.13, o investimento em ST T é necessário para sustentar o investimento em CG e cumprir os requisitos mínimos em Portugal; esta composição pacote tem ROI de 47%.

O sistema de preparação de AQS pode ser substituído no final do ciclo de vida do equipamento existente. No entanto, isto representa uma pequena redução no custo global. O sistema CG em conjunto com o ST T fornecem uma oportunidade de investimento imediato, uma vez que o edifício não tem restrições técnicas ou arquitetónicas, tais como orientação do edifício ou sombreamento. Esta opção é melhor do que o investimento em AC junto com EG, para esta gama de necessidades de energia útil.

O sistema CB, aqui projetado para aquecimento e preparação de AQS para todo o edifício, oferece ROI negativo, embora reduza significativamente as necessidades de energia primária. Possivelmente, será uma boa alternativa para os próximos anos, em combinação com o sistema solar térmico (na produção de AQS), uma vez que o custo de lenha e *pellets* deve permanecer baixo. Há uma necessidade de mais investigação técnica para este tipo de aplicação.

Em relação ao investimento em PV, a tecnologia atualmente disponível não proporciona rentabilidade. Embora reduza significativamente as necessidades de energia primária, este equipamento não oferece um atraente retorno sobre o investimento, o que outrora foi possível, nos primeiros anos do regime subsidiado.

A redução das taxas de referência para microprodução, a partir de 2014 [45], desestimula a venda da produção excedente à rede, incentivando a autoconsumo que obriga ao investimento acrescido de baterias, o que torna a medida inviável. Neste momento, não se sabe se o custo de investimento inicial poderá cair com o exetável progresso tecnológico ou como será a política de tarifas de referência para o regime subsidiado, nos próximos anos.

Em suma, a análise do desempenho individual dos sistemas baseados em FER demonstra que as potenciais economias de energia, por si só, não são suficientes para determinar a opção isolada por estes sistemas, tendo em vista a relevante participação que passam a ter os custos de investimento no custo global, o que minora a influência das poupanças obtidas com estas tecnologias estudadas.

Assumindo uma taxa de desconto de 3%, uma quantidade maior de pacotes apresentaria um ROI satisfatório, incluindo o pacote AC+PV sem isolamento, como pode ser visto na Figura 4.16. No entanto, GB+ST T sem isolamento continua sendo a melhor opção de investimento, uma vez GB sem isolamento não cumpre os requisitos mínimos em Portugal.

De qualquer forma, confirma-se que linhas de crédito com taxas de juros mais baixas podem incentivar o investimento em medidas de eficiência energética e o uso de energias renováveis, reduzindo o impacto ambiental.

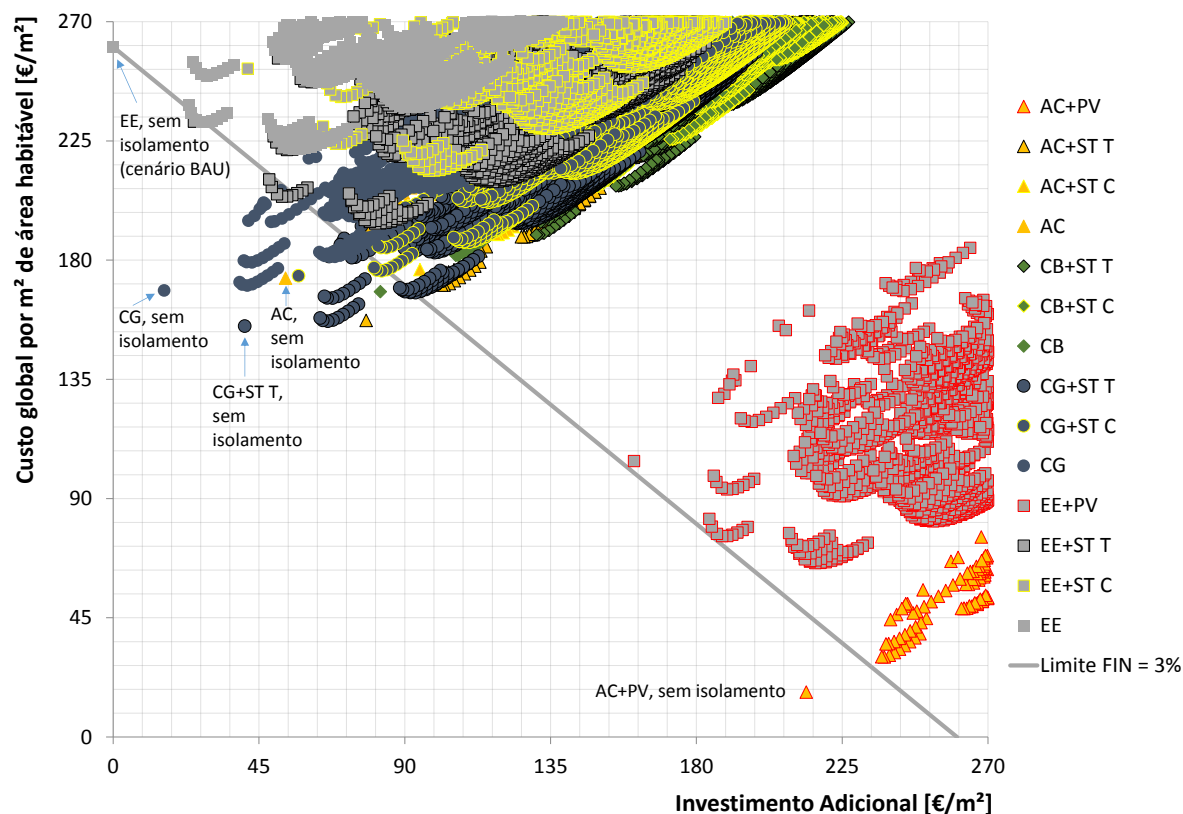


Figura 4.16. Custo global e investimento adicional de pacotes seleccionados e cenário BAU, na perspectiva financeira ($FIN = 3\%$) e para a zona climática com 1570 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.

4.1.4 Conclusões do caso de estudo I

Neste caso de estudo, o edifício de referência escolhido como exemplo de aplicação do método é representativo do parque edificado português de habitação, anterior a 1960. Na busca da configuração ótima da envolvente, foi **simulado o desempenho energético** deste edifício face a diferentes soluções construtivas de reabilitação, soluções essas que interagem com sistemas de aquecimento de baixa e alta eficiência.

Os parâmetros essenciais para a geração dos resultados analisados foram os graus-dias da região onde se insere o edifício e a radiação solar disponível para o mesmo local, o incremento de resistência térmica da envolvente, a eficiência do sistema de aquecimento e o fator de conversão da sua respetiva fonte de energia, para além, claro, dos custos de intervenção.

O método aplicado para a estimativa de necessidades de energia considerou um fator de redução de consumo aplicado aos resultados da simulação em método sazonal. Este fator de redução foi calculado com base em dados estatísticos que demonstram os hábitos de climatização dos portugueses (aquecimento e arrefecimento).

Inicialmente, foi utilizado o programa $\$e^3$ para a **simulação de rentabilidade** e posterior comparação com os requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios, conforme a metodologia recomendada pela Comissão Europeia. Assim, foram adotadas como funções objetivo a redução do custo global e a diminuição das necessidades de energia primária, buscando melhor retorno do investimento e menor impacto ambiental. Os resultados em três faixas de graus-dias de Portugal foram confrontados com exigências normativas atuais, revelando os valores ótimos de custo global e de necessidades de energia primária, durante os 30 anos do ciclo económico considerado.

O $\$e^3$ foi usado para calcular os cenários para a **análise de sensibilidade**: variação das necessidades de energia útil, dos preços de energia final e da denominada taxa de desconto. A sequência de passos proposta reduziu, significativamente, a quantidade de combinações a serem analisadas.

Este estudo também apresentou uma **análise do retorno sobre o investimento** (ROI) para a rentabilidade de medidas de eficiência e o uso de energias renováveis, contemplando 154.000 combinações de possíveis soluções para o edifício de referência. O problema de otimização foi resolvido pelo algoritmo evolutivo multiobjetivo AGe^3 , também atendendo o método apresentado no capítulo 3. No final, foram selecionados 18 pacotes para comparação dos resultados a partir da perspectiva financeira das **opções reais**.

Este primeiro caso de estudo permitiu concluir que:

- Apesar de Portugal ser um país pequeno, as diferenças de localização (latitude e altitude) influenciam as necessidades de energia dos edifícios de referência. Zonas climáticas com necessidades de aquecimento mais elevadas favorecem maiores espessuras de isolamento. No entanto, as diferenças dos custos globais associadas a espessuras próximas da ótima não são substanciais. Em localizações com clima mais ameno como o de Portugal, não há vantagem na utilização de espessuras maiores.
- Em relação à interação de medidas, a relação entre custo e espessura de isolamento [$\text{€}/r$], custo de operação do sistema de aquecimento [$\text{€}/\text{kWh}$] e eficiência [η] deste mesmo sistema influi diretamente na estratégia de reabilitação energética. Atualmente no mercado português, o investimento em sistemas é mais efetivo do que em isolamento, quando consideram-se as necessidades de aquecimento reduzidas para ter em conta os hábitos dos ocupantes dos edifícios.
- Conforme flutuação dos preços de isolamento, pode não ser rentável o investimento em isolamento, se forem considerados os valores próximos ao limite superior de preços praticados no mercado português. Estes preços influenciam diretamente a determinação dos níveis ótimos de rentabilidade e fazem com que a contínua reavaliação destes valores seja necessária para se alcançar o retorno desejado para o investimento.

- A correlação entre as taxas de desconto adotadas e a evolução do preço da energia estimada é determinante para a viabilidade dos investimentos em medidas de eficiência energética. Estimativas de reajustes de energia demasiadamente baixos combinados com altas taxas de desconto tendem a desestimular o investimento em soluções com menores necessidades de energia primária.
- O custo de energia, significativamente mais elevado na perspetiva financeira do que na macroeconómica, devido à relevante carga de impostos e taxas incidentes na primeira, favorece investimentos em reabilitação energética, principalmente em cenários onde há uso intensivo de energia.
- Os cálculos nas perspetivas financeira e macroeconómica tendem a eleger o mesmo pacote de rentabilidade ótima, de acordo com as taxas de desconto escolhidas para este estudo. Deste modo, considera-se que os custos de carbono atualmente estabelecidos, em contraposição a impostos e taxas considerados na perspetiva financeira, podem ser demasiado baixos para influenciar significativamente os níveis de ótimos de rentabilidade na perspetiva macroeconómica.
- Quanto à rentabilidade das medidas estudadas, a substituição do sistema de preparação de águas quentes sanitárias (AQS) apresenta uma oportunidade para a troca no final do ciclo de vida do equipamento existente no edifício de referência. A Caldeira a Gás (CG) em conjunto com um sistema Solar Térmico de Termossifão (ST T) fornece uma oportunidade de investimento imediato. Este sistema de aquecimento e preparação de AQS é melhor do que o investimento em sistema de Ar Condicionado (AC) em conjunto com Esquentador a Gás (EG), para uma baixa gama de necessidades de energia útil para aquecimento, como a considerada neste estudo. O sistema Caldeira a Biomassa (CB) oferece ROI negativo, embora reduza significativamente as necessidades de energia primária, e o Painel Fotovoltaico (PV), em *modus operandi* de autoconsumo, não proporciona rentabilidade.
- Reduzir o custo de capital por meio de oferta de linhas de crédito públicas a taxas abaixo de 6% poderá encorajar o investimento em eficiência energética e o uso de energias renováveis, minimizando as necessidades de energia primária. Neste cenário, uma maior quantidade de pacotes com menor impacto ambiental teria um ROI satisfatório.
- Em relação à reabilitação energética de edifícios, uma análise a partir da perspetiva financeira da teoria de opções reais é fundamental porque há questões de irreversibilidade e possibilidade de diferimento ligadas ao investimento. Principalmente em grandes projetos de investimento e quando grandes quantias estão envolvidas, o valor da flexibilidade operacional e outros fatores estratégicos, nomeadamente a possibilidade de diferimento, tem de ser adicionada ao Valor Atualizado Líquido (VAL) no processo de cálculo.

Nos estudos “*Energy efficiency measures in Portuguese residential buildings constructed before 1960 - A cost-optimal assessment*” [132] e “*Definition of reference buildings for energy*

performance calculation - Portuguese case” [66], foi possível observar que não existem diferenças significativas no posicionamento dos pacotes de medidas no gráfico de rentabilidade, pelo facto do edifício que abriga a unidade habitacional ser de uso unifamiliar ou multifamiliar, permitindo então que as principais conclusões deste caso de estudo sejam extensíveis a categoria de unidades residenciais em edifícios multifamiliares.

4.2 Caso de estudo II – edifício real

4.2.1 Introdução

A reabilitação energética de edifícios históricos pode não só ser atrativa em termos económicos, como também contribuir para a sustentabilidade ambiental do parque edificado. Este caso de estudo implementa uma análise integrada segundo critérios de rentabilidade e de avaliação de impacto ambiental, através da combinação de pacotes alternativos de medidas de eficiência energética. O presente estudo incide num edifício construído anteriormente a 1919 e que se localiza no centro da cidade de Coimbra, numa zona classificada. Trata-se de um edifício real que se prevê reabilitar e que é representativo de um conjunto de edifícios do parque imobiliário português.

A área classificada compreende um conjunto de edifícios cuja história está ou esteve intimamente associada à instituição académica, quer participando no processo de produção e divulgação de conhecimento, quer contribuindo para a construção das tradições culturais e identitárias singulares. As duas áreas inscritas contabilizam 35,5 hectares, dos quais 29 correspondem à Alta e 6,5 à Sofia. A envolver estas áreas estende-se a zona de proteção com 81,5 hectares. O total da área do Bem perfaz 117 hectares [138].

A Zona Central C1 [139], onde o edifício em estudo está inserido, corresponde à cidade histórica, caracterizando-se por um contínuo urbano de origem medieval composto maioritariamente por construções correntes. A salvaguarda desta zona central da cidade deve preservar as tipologias tradicionais, mantendo o equilíbrio entre as funções residencial, comercial e institucional. A escolha desta categoria de edificação possibilita estender as conclusões do estudo a edifícios similares, principalmente localizados nos centros antigos de todo o país e representativos desta parcela do parque edificado Português. A reabilitação do edifício está a cargo da Câmara Municipal de Coimbra e prevê um uso misto: habitação multifamiliar e serviços.

Neste caso de estudo é selecionado um conjunto de medidas de eficiência energética adequadas à reabilitação, sem que o cumprimento de certos requisitos mínimos de desempenho energético altere de forma inaceitável o carácter ou o aspeto da edificação. Os elementos analisados são a envolvente opaca (cobertura, fachada e pavimento) e envidraçada (caixilharias), considerando a sua interação com sistemas convencionais de aquecimento e preparação de AQS, além de sistemas baseados em FER.

Os resultados também foram analisados para o mesmo edifício em dois outros locais (no norte e no sul de Portugal) para se ter em conta o seu desempenho energético em diferentes localizações. Adicionalmente, foi implementado um modelo análise de ciclo de vida (ACV) para avaliar diferentes medidas de eficiência energética. As necessidades de energia útil foram calculadas usando tanto o método sazonal como a simulação dinâmica. Os custos de investimento de cada medida de eficiência energética foram calculados considerando os custos atualizados de mercado [114].

Para além do comportamento energético deste edifício, este estudo analisa a influência da variabilidade dos dados climáticos, dos custos de intervenção (aquisição de materiais e equipamentos, mão-de-obra e manutenção) nos níveis ótimos de rentabilidade. Adicionalmente procede-se a uma análise de sensibilidade da variação das necessidades de energia útil, dos preços de energia e da taxa de desconto.

Apesar de edifícios históricos não terem de cumprir os requisitos mínimos de desempenho energético, neste caso de estudo pretende-se demonstrar a importância da reabilitação energética de construções antigas, sem se afetar o valor histórico e arquitetónico destes edifícios. Complementa-se o estudo com a avaliação de impacto ambiental em que se prevê verificar se as soluções com uma boa relação custo-benefício ficam comprometidas quando se faz uma abordagem de ACV “*cradle-to-gate*” com fase de uso.

4.2.2 Descrição do edifício

O edifício utilizado neste estudo localiza-se em Coimbra, na Rua Fernandes Tomás, n.º 58-66, na freguesia de Almedina, correspondente à antiga Rua das Fangas, designação atribuída no século XVI, relacionada com o comércio de cereais [140]. Arquitetonicamente o edifício é de construção de finais do século XIX, apresenta uma configuração retangular e é composto por cinco pisos: subcave, cave, rés-do-chão, primeiro andar, segundo andar e sótão. Apresenta quatro portas para o exterior, todas elas com entrada pela Rua Fernandes Tomás, ao nível do rés-do-chão.

Segundo o plano municipal de ordenamento do território vigente [139], o edifício localiza-se na Zona Central C1, considerada zona de alto valor histórico e centralidade, a conservar, recuperar e dinamizar. Nesta área, não se pode aumentar a volumetria existente ou alterar a composição e os materiais utilizados nas fachadas. Zona ocupada, sobretudo pelo setor terciário, deve manter e, sempre que possível, aumentar a ocupação residencial no Centro Histórico.

Denominada “Casa das Talhas”, pelo facto de na subcave existir um grande número de talhas em cerâmica (também designados como potes de barro), o edifício em estudo conta com um projeto de reabilitação que prevê uso misto (habitação nos pisos superiores, estabelecimento de restauração e bebidas no piso térreo, cafetaria “literária” e galeria/espço museológico na cave e subcave, com acesso e receção previstos para o rés-do-chão). A Figura 4.17 apresenta uma imagem da fachada principal da “Casa das Talhas”.



Figura 4.17. Fotografia da “Casa das Talhas”, situada à Rua Fernandes Tomás n.ºs 58-66, na Zona Central C1, em Coimbra.

Este caso de estudo centra-se num apartamento (com 119 m² de área habitável), na parte sul do edifício. A Figura 4.18 apresenta os desenhos técnicos (fachada principal, seções e planos) do apartamento.

a)

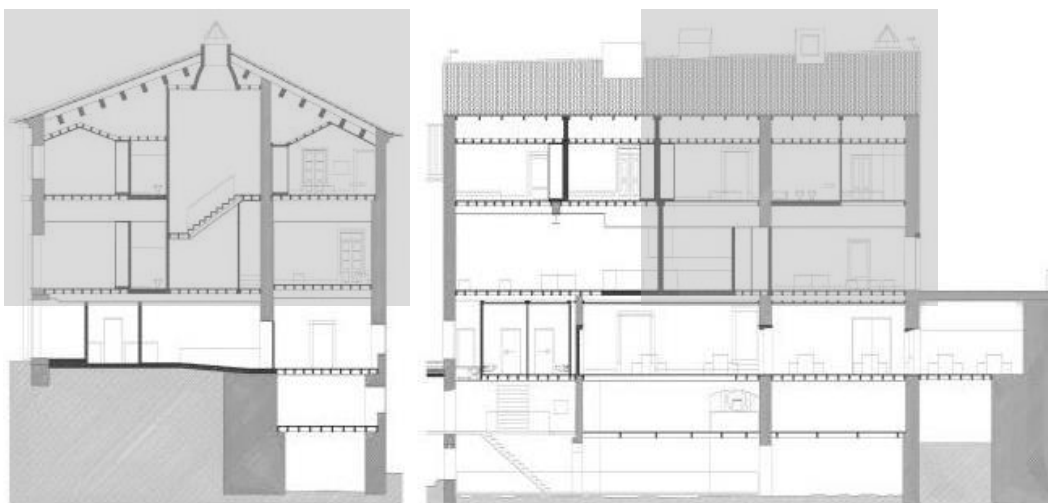


b)

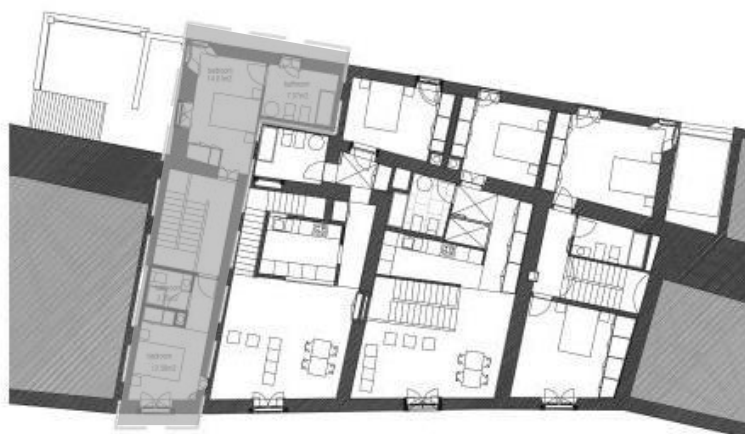


Fachada principal

c)



Seções A e B do apartamento em estudo



Primeiro e segundo pavimentos

Figura 4.18. Desenhos da “Casa das Talhas” com identificação do apartamento em análise: a) modelo 3D simplificado; b) fachada principal; c) seções A e B, primeiro e segundo pavimentos.

Nota: O apartamento estudado é identificado com uma transparência.

As dimensões deste edifício são indicadas na Tabela 4.15 e correspondem a medições obtidas pelo interior do edifício. Os seus parâmetros térmicos originais, nomeadamente o coeficiente de transmissão térmica U [59], o fator solar dos envidraçados g_w , e a taxa de renovação horária rph , encontram-se expressos na Tabela 4.16.

As janelas são emolduradas em madeira e compostas por vidros simples com fator solar g_w de 0,85 e um valor de transmissão térmica U de 5,10 [W/(m².°C)]. Os dispositivos de sombreamento são assumidos como sendo cortinas coloridas claras de tecido fino com um fator solar de 0,38.

Apurou-se, ainda, que a média da inércia térmica do edifício corresponde à classe média. Assume-se que o edifício em estudo, em sua configuração original, conta com sistema para aquecimento com eficiência nominal de 1,00 e um sistema para preparação de AQS com eficiência nominal de 0,60.

Tabela 4.15. Características dimensionais do edifício de referência.

A_f (área do pavimento)	70 m ²
h (pé-direito)	2,85 m
A_e (área da envolvente)	70,5 m ²
A_w (área das janelas)	17,15 m ²
A_r (área da cobertura)	57 m ²

Tabela 4.16. Características térmicas do edifício de referência.

U_r	2,10 W/(m ² .°C)
U_e	1,84 W/(m ² .°C)
U_f	1,40 W/(m ² .°C)
U_w	5,10 W/(m ² .°C)
g_w	0,85
rph	0,4 h ⁻¹

Os cálculos iniciais foram realizados utilizando-se os dados climáticos da cidade de Coimbra, o que representa o nível de 1304 GD, inserindo-se na zona climática de inverno I2, de acordo com o Despacho 15793-F/2013, que integra o Decreto-Lei 118/2013 [16]. As necessidades de arrefecimento foram negligenciadas, após se ter verificado que nalguns casos apresentaria condições para tal e se ter assumido não variar estas condições.

4.2.3 Aplicação do método e discussão de resultados

Neste caso de estudo, foram simuladas todas as combinações para as soluções selecionadas, percorrendo-se as quatro fases descritas no capítulo 3.

O método aplicado selecionou pacotes de reabilitação energética, sem que o cumprimento dos requisitos mínimos de desempenho energético alterasse de forma inaceitável as características do edifício, tendo em vista tratar-se de uma edificação de interesse histórico e arquitetónico.

A AES indicou o EPS (com condutividade térmica de $0,036 \text{ [W/(m}\cdot\text{°C)]}$), como a opção mais rentável para aplicação nesta unidade residencial do edifício. Ao seu custo médio de € 2,30 por resistência unitária $[\text{€/r}]$ foi somado o valor de $17 \text{ [€/m}^2\text{]}$ que representa os custos de aplicação, composto por mão-de-obra e acessórios. Foram considerados custos de aplicação mais elevados ao isolamento do pavimento ($34 \text{ [€/m}^2\text{]}$), o que reflete as dificuldades acrescidas, inerentes à aplicação desta medida em edifícios com estas características.

Para o limite superior de preços assumiu-se o aglomerado de cortiça expandida com massa volumétrica média (ICB-MD) com condutibilidade térmica igual a $0,045 \text{ [W/(m}\cdot\text{°C)]}$, com o preço do material de € 15,48 por resistência unitária $[\text{€/r}]$ e de $13,25 \text{ [€/m}^2\text{]}$ para aplicação. Para ter em conta preços mais elevados para o isolamento do pavimento, assumiu-se $52,18 \text{ [€/m}^2\text{]}$, valor esse que representa o preço de aplicação.

Foi considerada a aplicação do isolamento pelo interior no caso da fachada, sob as telhas da cobertura e sobre a laje no pavimento. A gama de espessuras das soluções varia entre 40mm e 160mm. Note-se que o edifício, na sua configuração original, não possui isolamento na envolvente. Na Tabela 4.17, apresenta-se as várias soluções para cada uma das partes da envolvente opaca, as quais foram combinadas entre si.

Tabela 4.17. Espessuras de isolamento térmico e coeficientes de transmissão térmica das soluções de cobertura, paredes e pavimento.

<i>Cobertura</i>		<i>Paredes</i>		<i>Pavimento</i>	
e [mm]	U $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{°C})]$	e [mm]	U $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{°C})]$	e [mm]	U $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{°C})]$
0	2,10	0	1,84	0	1,40
40	0,63	40	0,60	40	0,55
60	0,47	60	0,45	60	0,42
80	0,37	80	0,36	80	0,34
100	0,31	100	0,30	100	0,29
120	0,26	120	0,26	120	0,25
160	0,23	140	0,23	140	0,22

A AES indicou a segunda caixilharia em PVC como opção mais adequada para os envidraçados. Assim, o envidraçado característico do edifício foi complementado pela instalação de uma segunda caixilharia em PVC, em alguns dos pacotes. Nesta condição, o envidraçado teve o seu fator solar reduzido para 0,66 e o seu coeficiente de transmissão térmica reduzido para $1,53 \text{ [W}/(\text{m}^2\cdot\text{°C})]$.

As simulações preliminares realizadas com o procedimento expedito indicaram o Ar Condicionado (AC) combinado com o Esquentador a Gás (EG) e a Caldeira a Gás (CG) como sistemas competitivos para a gama de necessidades de energia útil considerada neste caso de estudo, conforme pode ser observado na Figura 4.19.

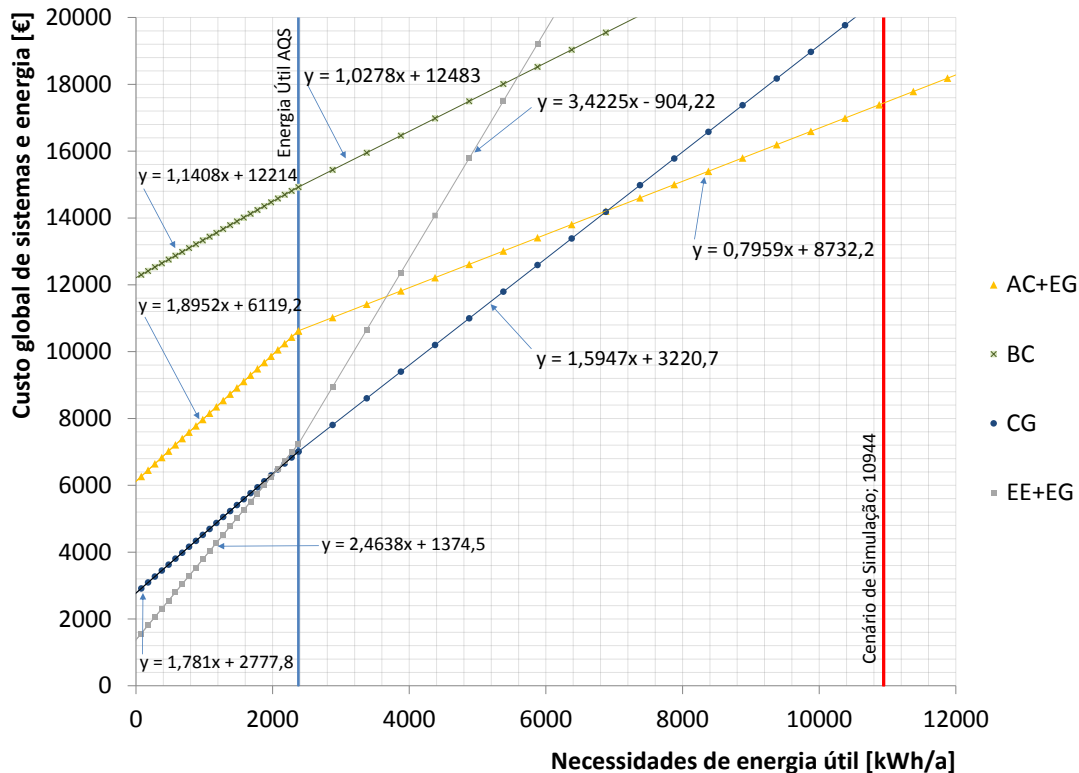


Figura 4.19. Indicação de custo global de sistemas e energia para um cenário de simulação de 10.944 [kWh/a] de necessidades de energia útil para aquecimento e AQS, pelo procedimento expedito.

A Bomba de Calor (BC) não apresentou competitividade e a Caldeira a Biomassa (CB) não foi considerada por não haver espaço disponível para sua instalação. O Emissor Elétrico (EE) combinado com EG, já presentes no edifício de referência, também são considerados para comparação de resultados. Na Tabela 4.18 resumem-se as combinações consideradas para os sistemas de aquecimento e preparação de AQS.

Tabela 4.18. Sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados.

<i>h,k</i>	<i>Sistema de Aquecimento</i>			<i>w,k</i>	<i>Sistema de preparação de AQS</i>		
	<i>Equipamento</i>	<i>Combustível</i>	<i>Eficiência</i>		<i>Equipamento</i>	<i>Combustível</i>	<i>Eficiência</i>
<i>h,1</i>	Emissor Elétrico	Eletricidade	1,00	<i>w,1</i>	Esquentador a Gás	Gás	0,60
<i>h,2</i>	Ar Condicionado	Eletricidade	4,30	<i>w,2</i>	Esquentador a Gás	Gás	0,78
<i>h,3</i>	Caldeira a Gás	Gás	0,93	<i>w,3</i>	Caldeira a Gás	Gás	0,83

Nota: *h,k* identifica cada sistema de aquecimento e *w,k* identifica cada sistema de preparação de AQS, onde *h,1* combina somente com *w,1* e assim por diante.

Foi considerada a ocupação da habitação por quatro pessoas. Um volume total de 160 litros por dia (40 litros por pessoa) foi assumido para preparação de AQS. Os cálculos das necessidades energéticas também foram realizados utilizando-se um programa de simulação dinâmica de energia (*EnergyPlus*) [141], seguindo orientações contidas na ISO 14040:2006 [73].

O sistema de aquecimento foi apenas parcialmente ativado durante as horas de ocupação, com cargas principalmente à noite, nos dias de semana e nos finais de semana. O perfil de aquecimento definido para este apartamento foi: 6h00 às 08h00 (09h00 nos fins de semana) e das 18h00 (17h00 aos fins de semana) às 00h00, dentro da faixa de temperatura estabelecida para conforto térmico.

O perfil de ocupação utilizado no modelo de simulação dinâmica mostrou um decréscimo de 32-46% (dependendo da localização) sobre as necessidades de aquecimento, inicialmente estimadas pelo método sazonal. Assim, na SDE foram aplicados à estimativa sazonal fatores multiplicativos de 0,54 (987 GD), 0,66 (1304 GD) e 0,68 (1924 GD) para cada um dos pacotes, de forma a considerar o impacto do perfil de ocupação sobre a previsão deste método.

Reitera-se que, em termos regulamentares e no caso de edifícios anteriores a 1960, o valor das necessidades de energia primária, *PE*, não pode exceder em mais de 50% o limite definido para o edifício com os parâmetros de referência [16].

Na SRM, os pacotes de reabilitação energética combinaram alternativas de isolamento térmico (incluindo a opção sem isolamento) para a cobertura (7), paredes exteriores (7) e pavimento (7), considerando opções de envidraçados (2) e a utilização de diferentes sistemas aquecimento da área habitável e preparação de AQS (3). A avaliação paramétrica resultou em **2.058** pacotes de reabilitação energética calculados para cada localidade (6.174 no total).

A SRM considerou taxas de desconto de 6% e 3% para as perspetivas financeira e macroeconómica, respetivamente, além de um ciclo económico de 30 anos.

Após a SRM, um modelo de análise de ciclo de vida (ACV) foi desenvolvido para nove pacotes previamente selecionados (dentro dos níveis ótimos de rentabilidade) para cada localidade para avaliar alternativas de materiais de isolamento e identificar os níveis de espessura ideal em termos de energia primária não-renovável (EPNR), calculada pelo método da necessidade de energia acumulada (CED) para abordar o esgotamento de recursos de energia, e de emissões de gases com efeito estufa (GEE), calculadas pelo método de avaliação do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) [142].

O modelo de ciclo de vida incluiu os seguintes processos principais: a remoção dos componentes originais, construção e fase de utilização (aquecimento, preparação de AQS e manutenção). A fase final da vida útil dos novos componentes não foi contemplada (cenários de desmantelamento e tratamento de resíduos após a vida útil).

A unidade funcional selecionada para este estudo foi um metro quadrado de área habitável ao longo de um período de 30 anos.

Os dados de inventário para os pacotes alternativos em matéria de produção e transporte de material foram obtidos a partir Kellenberger [143], Spielmann [144], Althaus [145] e Hischer et al. [146]. O inventário do modelo e do ciclo de vida foram implementados utilizando o programa SimaPro 8 [147].

No final foi realizada a ASP, comparando-se a rentabilidade em diferentes cenários.

4.2.3.1 Resultados do $\$e^3$

4.2.3.1.1 Efeito da variabilidade do custo do isolamento térmico e dos dados climáticos

Os resultados de energia primária para a simulação de rentabilidade de medidas (SRM) foram calculados utilizando o método sazonal, com os respetivos fatores de redução, conforme o padrão de ocupação estabelecido.

O comportamento da curva de rentabilidade foi analisado de acordo com os limites inferior e superior de custo do isolamento.

Os resultados mostram agrupamentos ou “nuvens” de pacotes ligados a cada sistema de aquecimento.

Na Figura 4.20 pode ser visto que o custo do isolamento térmico no limite superior aumenta ainda mais os custos globais associados às maiores espessuras, desencorajando assim o investimento.

No limite inferior do custo do isolamento, os níveis ótimos de rentabilidade variam entre 53 e 67 [kWh/(m².a)] nas necessidades energéticas primárias para 1304 GD (Coimbra).

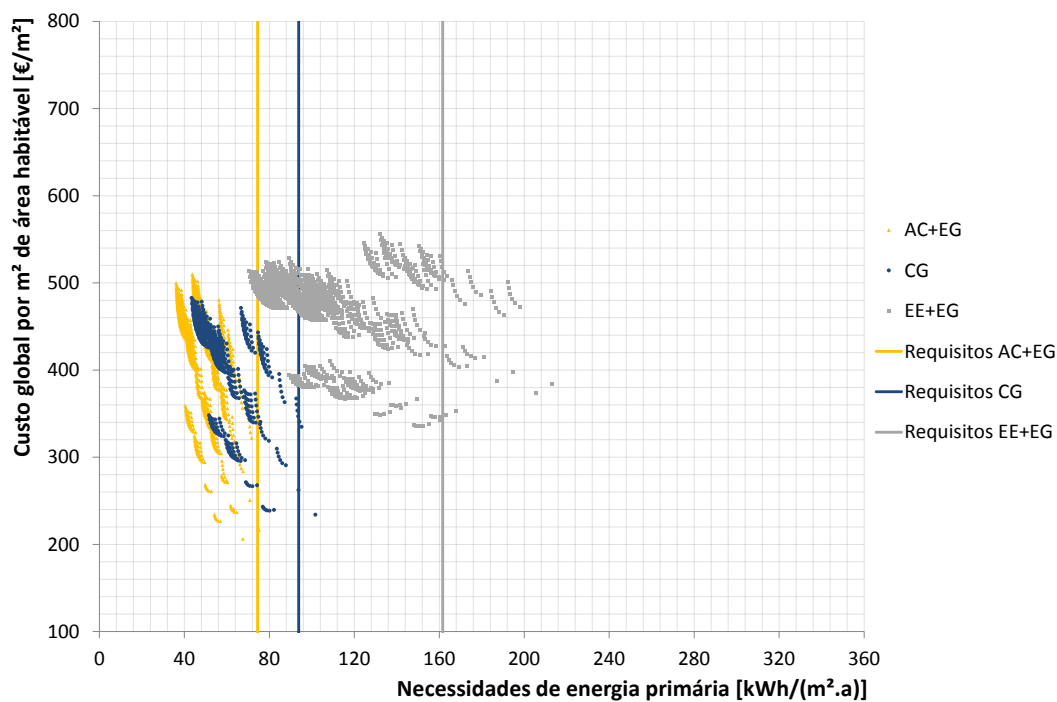
No detalhe da Figura 4.20-b, é possível observar que os melhores pacotes com CG variam entre 77 e 82 [kWh/(m².a)].

No entanto, a espessura de isolamento de rentabilidade ótima depende dos componentes da envolvente e da localização do edifício.

A Figura 4.21-a mostra que, os níveis ótimos de rentabilidade variam entre 60 e 86 [kWh/(m².a)] para 1924 GD. Na Figura 4.21-b, os níveis ótimos de rentabilidade variam entre 43 e 63 [kWh/(m².a)] para 987 GD.

Em relação ao custo global, os níveis ótimos de rentabilidade variam entre 181 e 224 [€/m²] para 987 GD, entre 206 e 228 [€/m²] para 1304 GD e entre 236 e 270 [€/m²] para 1924 GD.

a)



b)

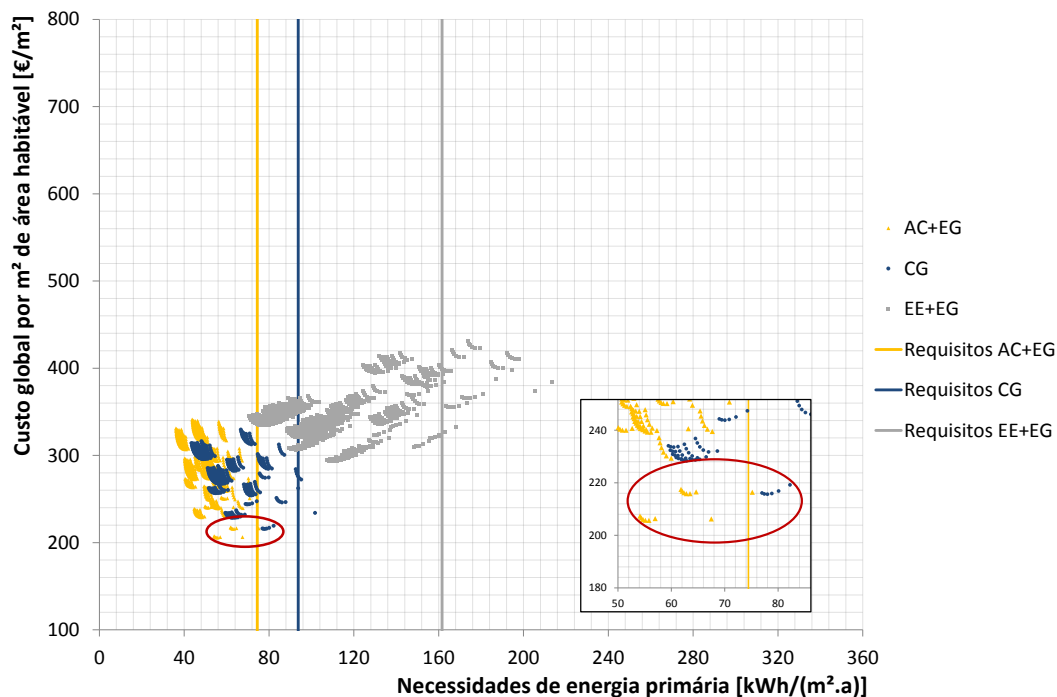
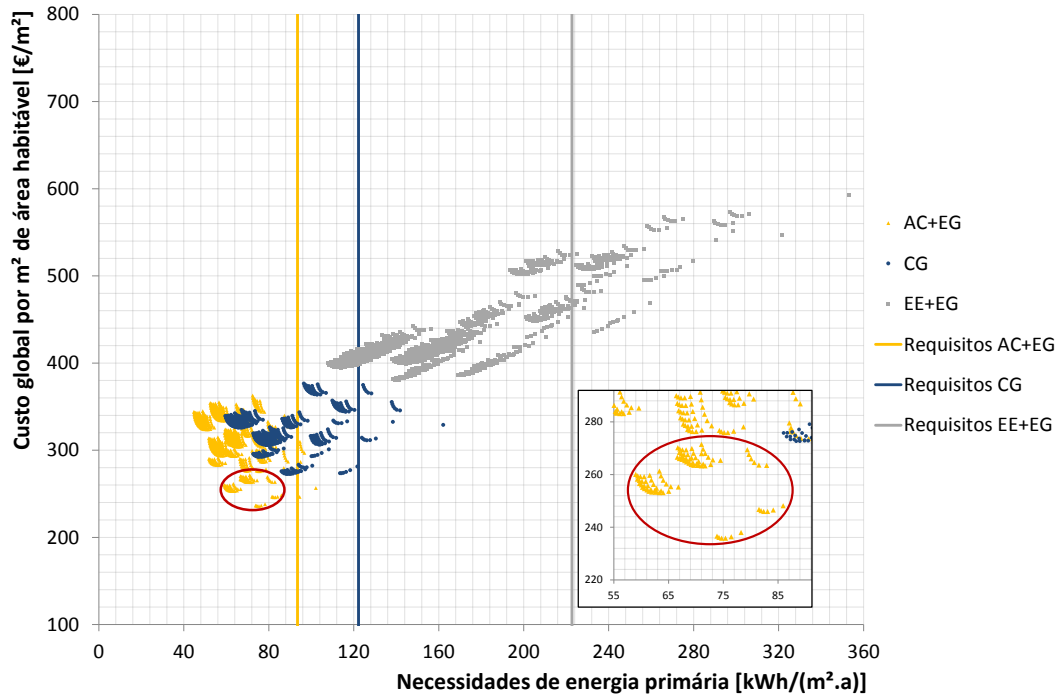


Figura 4.20. Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1304 GD: a) limite superior do custo do isolamento; b) limite inferior do custo do isolamento.

a)



b)

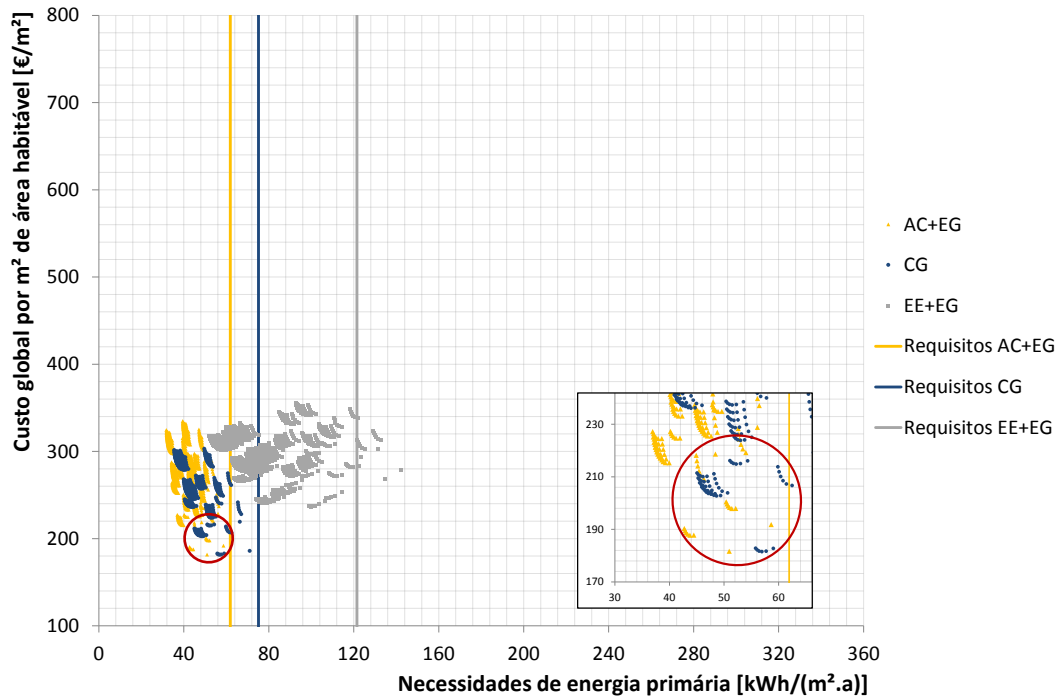


Figura 4.21. Custo global e necessidades de energia primária, na perspetiva financeira e para o limite inferior do custo do isolamento: a) edifício localizado na zona climática com 1924 GD; b) edifício localizado na zona climática com 987 GD.

4.2.3.1.2 *Análise de sensibilidade*

Os pacotes de reabilitação devem cumprir os requisitos mínimos de energia [16] e serem mais rentáveis do que o cenário BAU (*business as usual*), o que significa que eles devem ter menores necessidades de energia primária e custo global mais baixo, durante o ciclo de vida estudado.

Assim, foi realizada uma análise de sensibilidade para avaliar a influência da variação das necessidades de energia útil, dos preços de energia e das taxas de desconto, para todos os pacotes de reabilitação energética e para Coimbra (1304 GD).

A comparação das Figuras 4.22-a e 4.22-b mostra diferenças significativas. As necessidades de energia primária variam entre 28 e 307 [kWh/(m².ano)], quando são consideradas 100% das necessidades de energia útil estimadas pelo método sazonal, enquanto com o fator de redução (0,66) variam entre 22 e 213 [kWh/(m².ano)].

Esta análise mostra como o método de sazonal sobrestima as necessidades de energia no seu cálculo por assumir que as famílias ocupam e aquecem permanentemente a habitação.

Por exemplo, na fração em estudo, a conta de energia mensal média, somente para aquecimento e preparação de AQS, seria € 203 com o fator de redução e € 291 considerando 100% das necessidades de energia útil estimadas pelo método sazonal, para Coimbra.

Ainda assim, são valores considerados elevados e deve-se avaliar se climatizar toda a área habitável representa, realmente, o hábito dos portugueses.

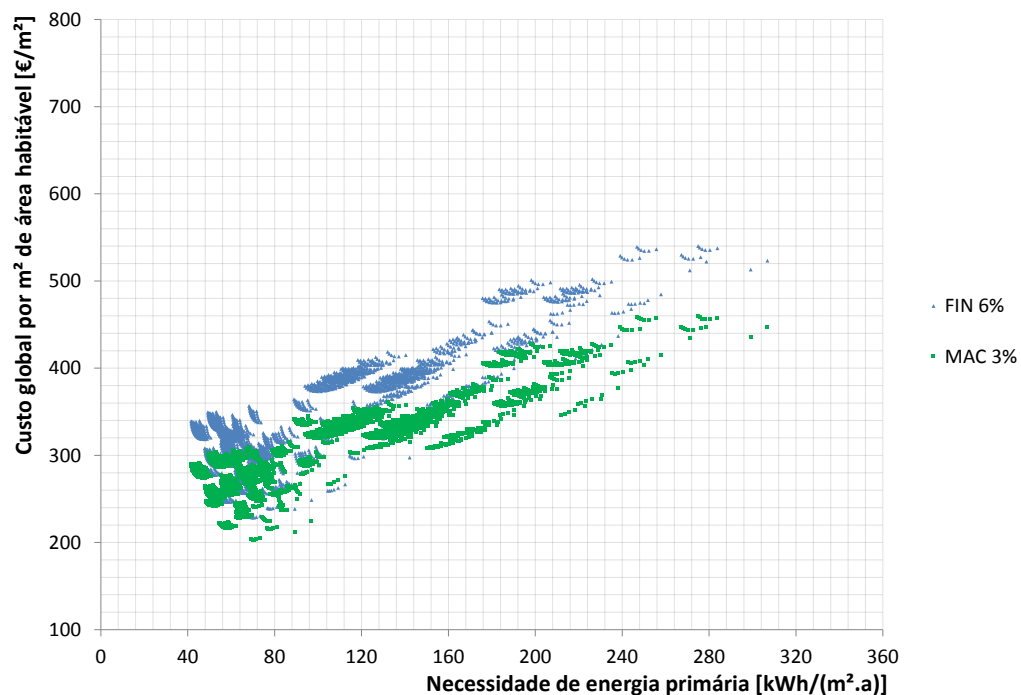
A Figura 4.22 também permite observar que os níveis ótimos de rentabilidade nas perspetivas financeira e macroeconómica (FIN = 6%, MAC = 3%) apresentam diferenças substanciais. Os custos de energia, que são significativamente mais elevados na perspetiva financeira devido a impostos e taxas, podem promover o investimento em reabilitação energética, na perspetiva do investidor.

Mais uma vez, isso depende de que estes níveis de consumo de energia reflitam a realidade e os hábitos de climatização e que as poupanças sejam realmente alcançáveis.

Comparando-se as Figuras 4.23 e a Figura 4.22-b, nota-se que a diferença significativa entre os dois cenários de evolução dos preços da energia (aumento linear de 2,5% versus Eurostat) não provoca alterações relevantes nas curvas de rentabilidade ótima, para Coimbra.

O aumento isolado do custo de energia não é suficiente para alterar significativamente os pacotes de rentabilidade ótima. No entanto, na perspetiva financeira, enquanto no cenário Eurostat o custo global varia entre 206 e 431 [€/m²], no cenário de aumento linear de 2,5% o custo global passa a variar entre 222 e 480 [€/m²].

a)



b)

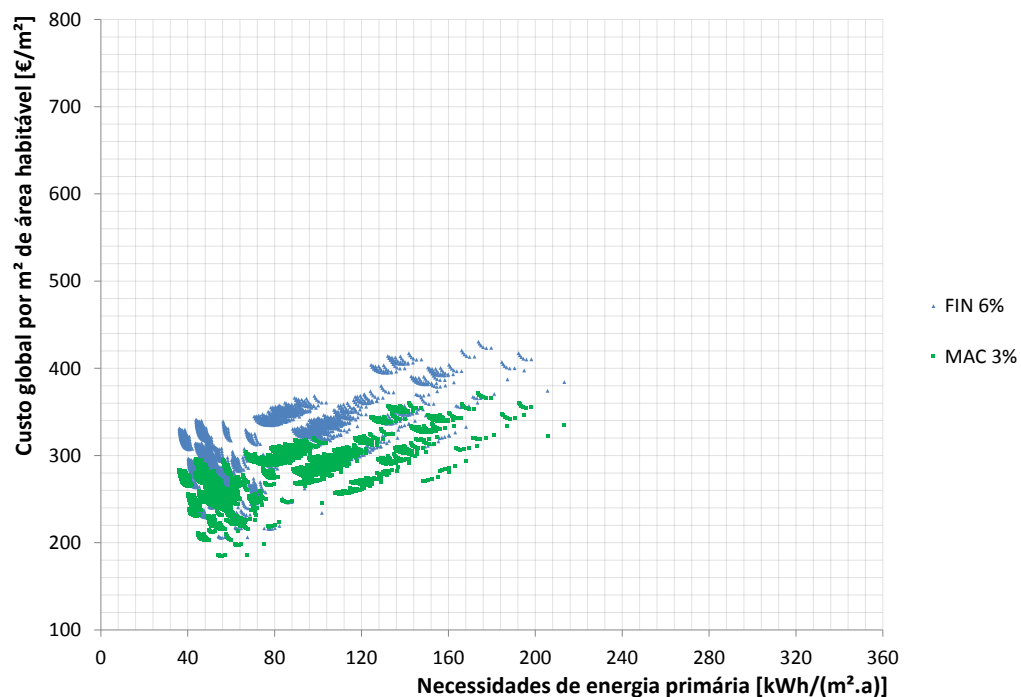


Figura 4.22. Custo global e necessidades de energia primária, nas perspetivas financeira e macroeconómica, para o limite inferior do custo do isolamento e zona climática com 1304 GD: a) resultados para 100% das necessidades nominais de energia útil para aquecimento; b) resultados para 66% das necessidades nominais de energia útil para aquecimento.

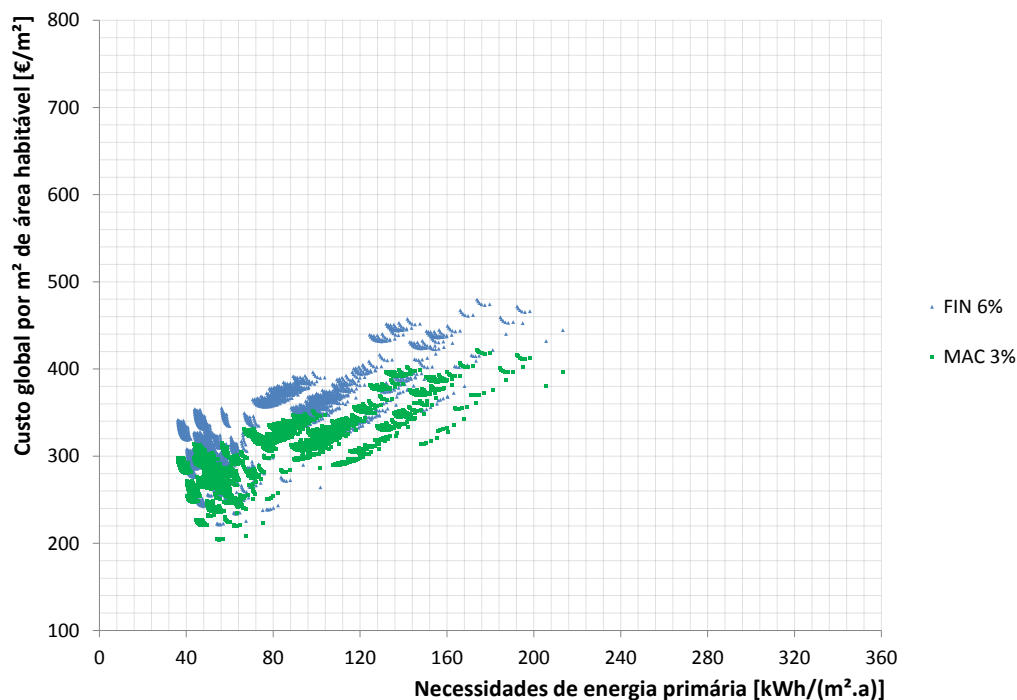


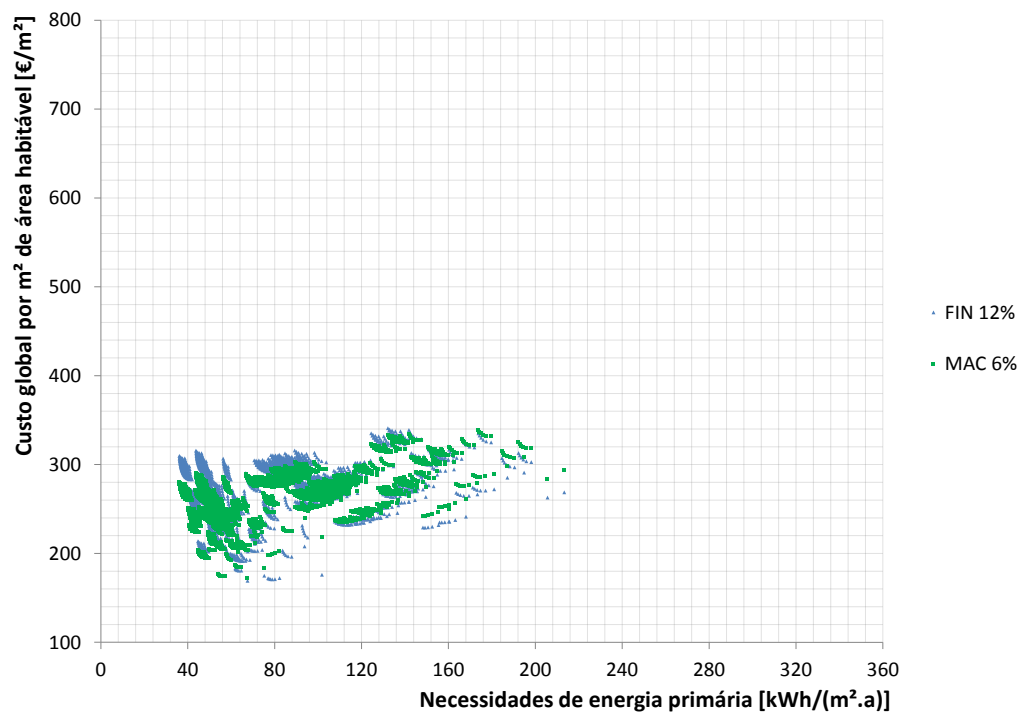
Figura 4.23. Custo global e necessidades de energia primária, nas perspetivas financeira e macroeconómica, para o limite inferior do custo do isolamento e zona climática com 1304 GD, no cenário de evolução linear dos preços de energia em 2,5%.

A Figura 4.24 mostra os resultados para $FIN = 12\%$ e $MAC = 6\%$ como taxas de desconto. A Figura 4.24-a mostra a conjugação destas taxas com um cenário de preços mais elevados para energia (evolução linear de 2,5%) e a Figura 4.24-b mostra estas mesmas taxas com o cenário de preços mais baixos (Eurostat). Nota-se que a diferença nos cenários de evolução dos preços da energia não provoca alterações nos pacotes de rentabilidade ótima, para Coimbra.

Os resultados da Figura 4.24-b, para o cenário Eurostat de evolução dos preços de energia, podem ser comparados com a Figura 4.22-b, para $FIN = 6\%$ e $MAC = 3\%$. Baixos preços de energia (como no cenário Eurostat) combinados com estimativas de alta taxa de desconto, como mostrado na Figura 4.24-b, desencorajam o investimento em pacotes com menores necessidades de energia primária. Na perspetiva financeira e com FIN de 12%, o custo global passa a variar entre 163 e 347 [€/m²].

Note-se que o potencial de poupança em custos de energia diminuem de forma mais acentuada em pacotes com maiores necessidades de energia primária, quando as taxas de desconto se elevam a $FIN = 12\%$. No cenário com as maiores necessidades de energia primária (um edifício sem qualquer medida de eficiência, 213 [kWh/(m².a)]), os custos globais diminuem de 384 ($FIN = 6\%$) para 249 [€/m²] ($FIN = 12\%$). Existe uma correlação entre a taxa de desconto e a evolução dos preços da energia, o que é relevante para a viabilidade do investimento em medidas de eficiência energética.

a)



b)

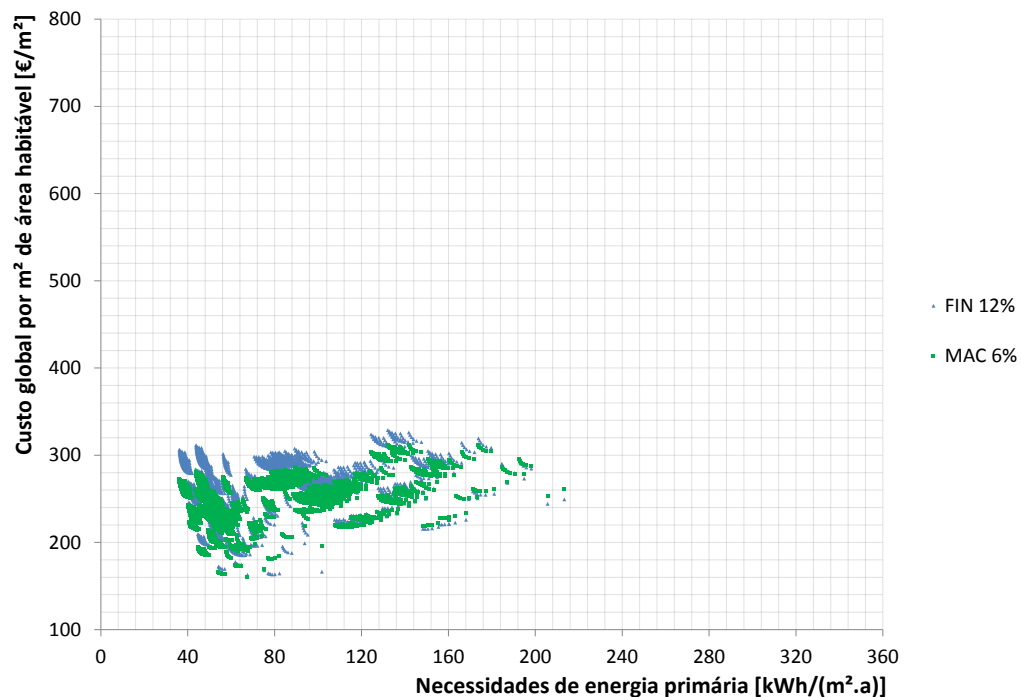


Figura 4.24. Custo global e necessidades de energia primária, nas perspetivas financeira e macroeconómica, para o limite inferior do custo do isolamento e taxas de desconto de 12% (FIN) e 6% (MAC): a) cenário de evolução linear dos preços de energia em 2,5%; b) cenário de evolução dos preços de energia Eurostat.

4.2.3.1.3 Rentabilidade dos sistemas baseados em FER

Dando sequência ao estudo de medidas de eficiência energética pelo \$e³, considerando diferentes espessuras de isolamento, a colocação de uma segunda caixilharia e sistemas convencionais para aquecimento e preparação de AQS, é avaliada a influência da incorporação de sistemas baseados em FER nas combinações já existentes.

Concentra-se os estudos na cidade de Coimbra (1304 GD) e é considerado como sistema FER somente o equipamento Solar Térmico de Circulação Forçada (ST C), combinado com os pacotes obtidos nas etapas anteriores do presente caso de estudo.

O sistema Solar Térmico de Termossifão (ST T) não é analisado por ser considerado inadequado a edifícios históricos.

É analisado o contributo do ST C para as duas funções objetivo, redução do custo global e diminuição das necessidades de energia primária.

No dFER, o equipamento é dimensionado para ocupar menos de 10% da área do telhado, não ser visualizado do nível da rua e não afetar as características arquitetónicas do edifício, produzindo o equivalente a 1286 [kWh/a] ou 10,8 [kWh/(m².a)] de energia útil para preparação de AQS.

Assim, nesta nova SRM, os pacotes de reabilitação energética combinam opções de isolamento térmico (incluindo a opção sem isolamento) para a cobertura (7), paredes exteriores (7) e pavimento (7), considerando opções de envidraçados (2) e a utilização de diferentes sistemas de aquecimento da área habitável e preparação de AQS (3), mais a opção de instalar ou não (2) um sistema de energia solar térmica, num total de **4.116** pacotes.

Os níveis ótimos de rentabilidade para todas as combinações na perspetiva financeira (FIN = 6%) podem ser vistos em maior detalhe na Figura 4.25.

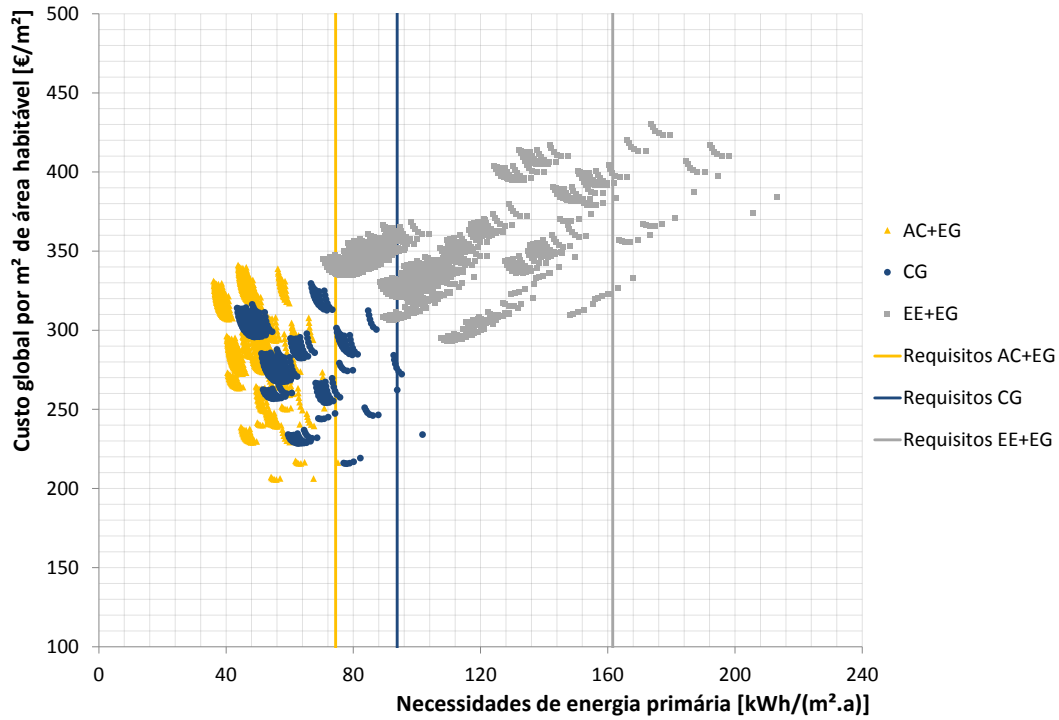
Os resultados mostram as curvas de rentabilidade sem FER (Figura 4.25-a) e com FER (Figura 4.25-b). Os gráficos apresentam as distribuições das soluções, e é novamente possível notar-se grupos ou “nuvens” de pacotes ligados a determinados sistemas de aquecimento convencionais (AC, CG e EE).

Repete-se o comportamento já verificado no caso de estudo I. O sistema solar térmico, ST C, reduz as necessidades de energia primária, mas não reduz o custo global.

Antes da incorporação do sistema baseado em FER, o custo global variava entre 206 e 431 [€/m²] e as necessidades de energia primária de 36 a 213 [kWh/(m².a)].

A partir da incorporação do ST C, o custo global passa a variar entre 218 e 437 [€/m²] e as necessidades de energia primária entre 23 e 195 [kWh/(m².a)].

a)



b)

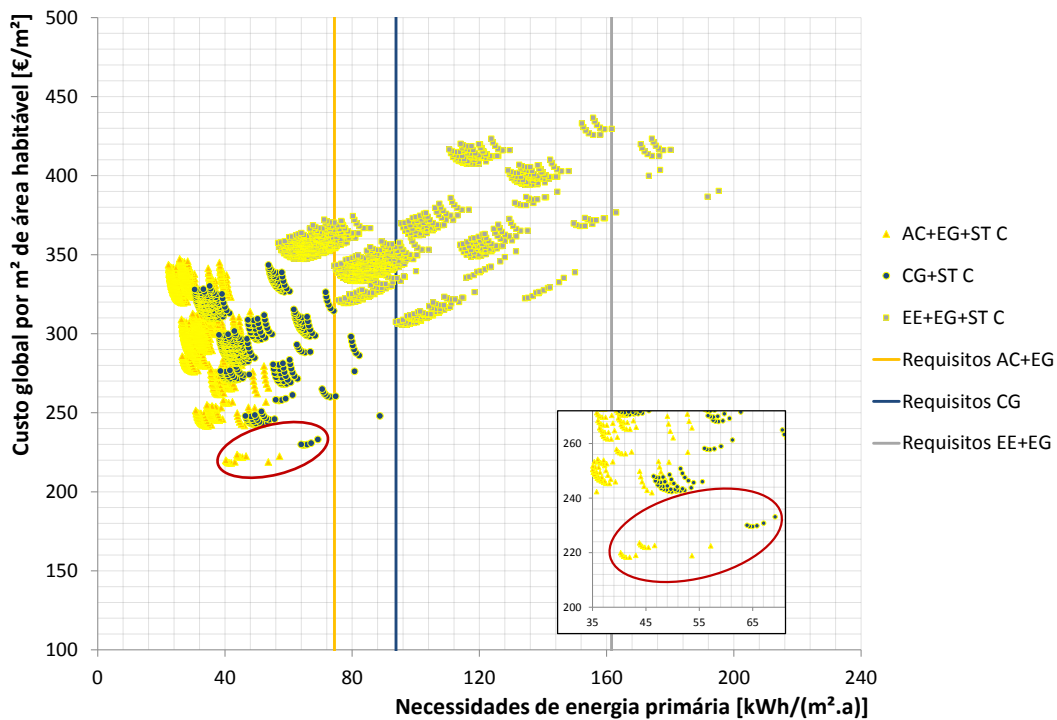


Figura 4.25. Custo global e necessidades de energia primária na perspetiva financeira de 2.058 pacotes, para a zona climática com 1304 GD e considerando o limite inferior do custo do isolamento: a) sem FER; b) com FER.

4.2.3.1.4 Perspetiva financeira na abordagem de retorno sobre o investimento

A fim de determinar as reais vantagens do investimento em reabilitação energética para investidores, a perspetiva financeira é analisada na abordagem de retorno sobre o investimento (ROI). Assim, o valor ajustado de investimento adicional em medidas, *AI*, é comparado com seu efeito no custo global, *GC*, e é também avaliado o ROI oferecido pelos pacotes de reabilitação energética disponíveis. Como demonstrado no capítulo 3, *AI* consiste no valor total investido em medidas de eficiência energética e o uso de energias renováveis que superam os custos para manter o cenário BAU.

Na Tabela 4.19, a análise de 15 pacotes selecionados de medidas de eficiência, em comparação com o cenário de referência, permite-nos compreender o impacto de cada ação, isoladamente e em conjunto com outras. A semelhança do caso de estudo I, quando consideramos perspetiva financeira do investidor, a situação muda significativamente, como demonstrado nesta tabela e na figuras seguintes.

Pacotes que incluem AC e que seriam considerados melhores opções, de acordo com a abordagem de rentabilidade recomendada pela Comissão Europeia, não o são, de acordo com uma abordagem de ROI, devido a uma melhor performance financeira da CG. Uma vez que as necessidades de energia útil no presente caso de estudo são significativamente maiores do que no caso de estudo I, a distância entre AC e CG diminuiu, mas o potencial de economia com custos de energia é ainda insuficiente para compensar o maior investimento inicial em AC.

Tabela 4.19. Cenário BAU (pacote 0) e 15 pacotes selecionados.

Pacote	Isolamento			Envidraçados		Sistemas		FER	Energia Primária [kWh/(m ² ·a)]	Custo Global FIN = 6% [€/m ²]	ROI FIN = 6% [30 anos]
	Cobertura e [mm]	Paredes e [mm]	Pavimento e [mm]	Janelas U [W/m ² ·°C]	Vidros g _w	Aquecimento Equipamento	AQS Equipamento				
0	-	-	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	-	213	384	-
1	60	-	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	-	163	326	295%
2	-	60	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	-	177	367	-46%
3	-	-	80	5,10	0,85	EE	EG 0,60	-	194	411	-156%
4	60	60	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	-	128	311	59%
5	-	-	-	1,53	0,66	EE	EG 0,60	-	195	397	-137%
6	-	-	-	5,10	0,85	AC	EG 0,78	-	67	206	420%
7	-	-	-	5,10	0,85	CG	CG	-	102	234	1652%
8	-	-	-	5,10	0,85	EE	EG 0,60	STC	195	390	-120%
9	140	140	140	1,53	0,66	AC	EG 0,78	STC	22	344	-81%
10	-	-	-	5,10	0,85	AC	EG 0,78	STC	54	219	158%
11	-	-	-	5,10	0,85	CG	CG	STC	89	248	254%
12	40	-	-	5,10	0,85	AC	EG 0,78	-	57	206	271%
13	40	-	-	5,10	0,85	CG	CG	-	82	219	640%
14	60	-	-	5,10	0,85	AC	EG 0,78	-	56	206	266%
15	60	-	-	5,10	0,85	CG	CG	-	80	217	621%

Na Tabela 4.19, o pacote 0 representa o edifício de referência num cenário *business as usual* (BAU). Os elementos que são alterados, em comparação com o cenário BAU, estão assinalados a amarelo. Os valores que não atendem aos requisitos mínimos sobre as necessidades de energia primária, custo global ou ROI estão assinalados a laranja, no âmbito das respetivas colunas. Da mesma forma, os valores assinalados a azul representam a melhor opção dentro destas mesmas colunas.

Destacam-se os pacotes 9, menores necessidades de energia primária, 14, menor custo global, e 13, ROI mais elevado (tendo em conta os requisitos mínimos para as necessidades de energia primária), de todas as 4116 combinações.

Os pacotes 1 a 4 consistem em apenas isolar componentes da envolvente opaca com placas de EPS, em espessuras que variam de 60 a 80mm. O pacote 5 contempla apenas a substituição de janelas. Os pacotes 6 a 8 consistem em substituir sistemas ou instalar ST C. Ou seja, pacotes 1 a 8 representam medidas individuais, destacando-se o seu impacto sobre as necessidades de energia primária, o custo global e ROI. Os pacotes 9 a 15 representam medidas combinadas e é possível ver a interação entre elas.

A comparação entre esses pacotes confirma que a substituição do sistema de aquecimento é muito mais rentável do que a melhoria do isolamento na envolvente opaca, de acordo com o critério económico ROI. Mesmo com este aumento de necessidades de energia útil, em relação ao caso de estudo I, confirma-se que nem sempre as economias de energia primária proporcionadas pela melhoria do isolamento térmico se traduzem em custos globais menores.

O pacote 13 proporciona um ROI de 640%, uma TIR de 14% (taxa interna de retorno sobre o investimento), um período de recuperação simples de 7 anos e um período de recuperação atualizado de 9 anos.

O pacote 7 oferece o maior ROI ao longo dos 30 anos, mas não está em conformidade com a regulamentação. Salienta-se que o pacote 13 só pode ser adotado porque a envolvente do edifício não está submetida a uma grande renovação, dado que a regulamentação em vigor [16] estabelece requisitos mínimos para os valores de transmitância térmica na envolvente que devem ser considerados, se fosse o caso.

Esta análise apresenta a importância de se avaliar o retorno do investimento numa perspetiva a longo prazo e também permite verificar que a abordagem de níveis ótimos de rentabilidade, recomendada pela Comissão Europeia, não é suficiente para fornecer a informação exigida pelos investidores.

A Figura 4.26 apresenta o gráfico de rentabilidade para os pacotes selecionados e os limites regulamentares atuais a serem cumpridos para as necessidades de energia primária, em função do sistema utilizado para aquecimento. Para este edifício e usando o sistema EE, o limite regulamentar de necessidades de energia primária é de 161,58 [kWh/(m².a)].

Para o sistema AC, o limite é de 74,44 [kWh/(m².a)] e de 93,79 [kWh/(m².a)] para CG. Assim, podemos ver que o cenário BAU referência (pacote 0) e pacotes de 1 a 3, 5, 7 e 8 não cumprem a regulamentação portuguesa.

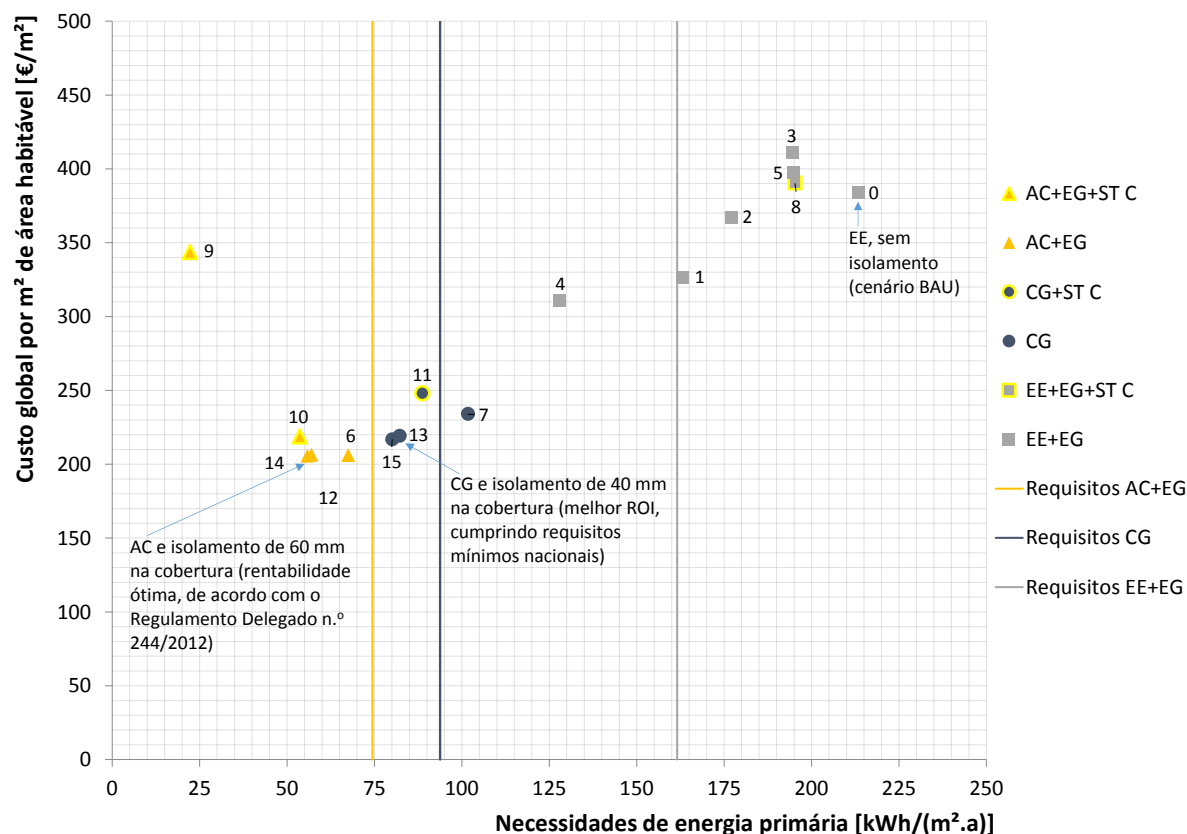


Figura 4.26. Custo global e necessidades de energia primária de 15 pacotes selecionados e cenário BAU, na perspectiva financeira e para a zona climática com 1304 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.

A Figura 4.27 mostra o gráfico do investimento adicional para os pacotes selecionados e inclui a linha cinza na qual o custo global de um determinado pacote, acrescentado do investimento adicional (montante investido a mais do que no cenário BAU), é igual ao custo global do cenário BAU adicionado dos custos de manutenção, substituição e valor residual de janelas e sistemas, já existentes no edifício de referência, durante o período de $\tau = 30$ anos.

Comparando-se os pacotes e usando esta linha cinza como referência, apenas aqueles que estão dentro do triângulo formado por esta linha e os eixos horizontal x e vertical y oferecem ROI positivo e o investimento adicional não é maior do que o custo global no cenário BAU, quando se considera uma taxa de desconto de 6%. Em pacotes que estão nesta linha, o investimento adicional não compensa a diminuição relativa no custo global, quando comparado com o cenário BAU. As soluções restantes (fora do triângulo) podem até mesmo reduzir o custo global (quando abaixo de € 384,24), mas oferecem ROI negativo.

Reitera-se que esta análise se limita ao retorno sobre o investimento para os pacotes que fornecem as mesmas condições de conforto térmico, sem considerar outros benefícios que certas medidas de reabilitação energética podem proporcionar.

Sobre este ponto, o interesse de cada investidor deve ser considerado na eleição do pacote de maior valor agregado, entre aqueles com maior retorno do que cenário BAU, bem como os requisitos mínimos a nível nacional. Por exemplo, podemos ver que a CG, sem isolamento ou qualquer outra medida (pacote 7), é melhor pacote na perspetiva financeira do investidor, mas esta opção não cumpre os requisitos mínimos, como revelado na Figura 4.26. Após a aplicação do isolamento de 40mm, a opção CG passa a atender os requisitos mínimos.

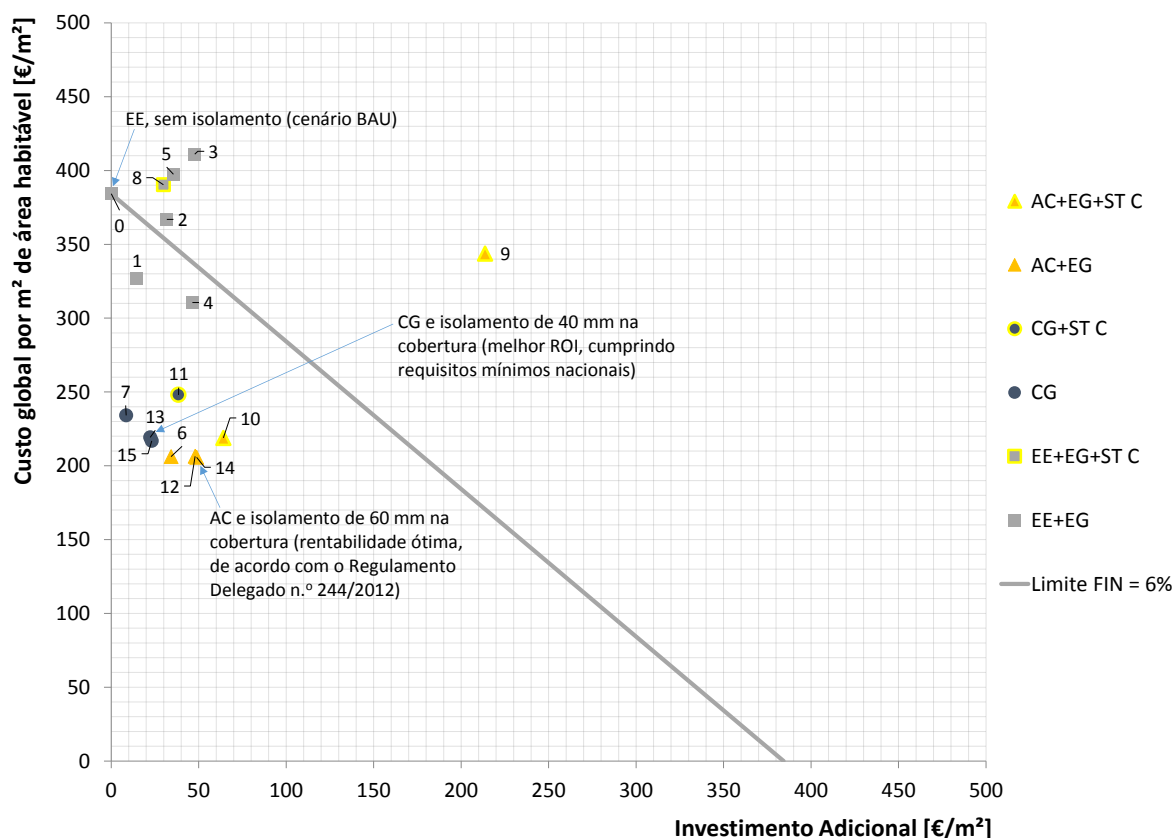


Figura 4.27. Custo global e investimento adicional de 15 pacotes selecionados e cenário BAU, na perspetiva financeira e para a zona climática com 1304 GD, considerando o limite inferior do custo do isolamento.

Os pacotes de 2, 3, 5, 8 e 9 têm um desempenho económico pior do que o cenário BAU. Em relação às opções reais que estão disponíveis para os investidores, fica claro que a rentabilidade depende do sistema de aquecimento que é adotado.

O investimento em sistemas com alta eficiência ou baixo fator de conversão de energia primária pode até mesmo permitir o diferimento do investimento em isolamento ou na substituição de janelas. O investimento na melhoria da envolvente representa um compromisso de capital por um período prolongado, devido aos longos ciclos de vida destes materiais.

A Tabela 4.20 resume a análise das opções reais.

Tabela 4.20. Análise resumida das opções reais.

<i>Medida: Investimento em</i>	<i>Ciclo de Vida [anos]</i>	<i>Contributo para o Custo Global [€/m²]</i>	<i>ROI do Investimento Adicional</i>	<i>Incerteza Técnica</i>	<i>Incerteza Económica</i>	<i>Risco</i>	<i>Opção</i>
Solar Térmico de Circulação Forçada	20	6	-120%	Baixo	Baixo	↓	Não investir
Ar Condicionado (aquecimento) e Esquentador de Água a Gás (AQS)	20	-178	420%	Baixo	Baixo	↓	*Não investir
Caldeira a Gás (aquecimento e AQS)	20	-150	1652%	Baixo	Baixo	↓	**Investir
Novas Janelas	40	13	-137%	Médio	Baixo	↓	Não investir
Isolamento da Envolvente Opaca	50	↓↑	↓↑	Médio	Baixo	↓	**Investir

* Apesar de apresentar um bom ROI e cumprir os requisitos quando acompanhado de isolamento da cobertura, CG tem melhor desempenho.

** Como demonstrado na Tabela 4.19, o investimento em isolamento da cobertura é necessário para sustentar o investimento em CG e cumprir os requisitos mínimos em Portugal; esta composição representa um ROI de 640%.

O sistema de preparação de AQS pode ser substituído no final do ciclo de vida do equipamento existente. No entanto, isto representa uma pequena redução no custo global. O sistema CG, em conjunto com isolamento com placas de 40mm de EPS na cobertura, fornece uma oportunidade de investimento imediato. Esta opção é melhor do que o investimento em AC junto com EG (também acompanhado de isolamento da cobertura), para esta gama de necessidades de energia útil.

A análise do desempenho individual do sistema baseado em FER, ST C, demonstra que as potenciais economias de energia, por si só, não são suficientes para determinar a opção isolada por este sistema, tendo em vista a relevante participação que passam a ter os custos de investimento no custo global, o que reduz a influência das poupanças obtidas com esta tecnologia.

4.2.3.2 Resultados do SimaPro 8

Para a avaliação de impacto ambiental, foram selecionados nove pacotes de reabilitação energética por localidade foram selecionados a partir da SRM. O pacote com Ar Condicionado (AC) para aquecimento, em conjunto com o Esquentador a Gás (EG) para preparação de AQS, acompanhado do isolamento da cobertura com 60mm de EPS revelou ser a opção de rentabilidade ótima. Já o critério ROI mostrou que o pacote com Caldeira a Gás (CG), acompanhada do isolamento da cobertura com 40mm de EPS, como sendo a opção com melhor retorno sobre o investimento.

Em ambas as abordagens, concluiu-se que espessuras superiores a 80mm são economicamente inviáveis devido a não corresponderem a um acréscimo de poupança de energia útil vantajoso. No entanto, na avaliação de impacto ambiental, diferentes espessuras de isolamento nos níveis ótimos de rentabilidade foram estudados, de forma a se perceber a extensão da sua influência nos resultados.

O isolamento do pavimento não se encontra nos níveis ótimos de rentabilidade e foi definida como uma medida não-rentável, como em outros estudos que utilizaram os preços de mercado em Portugal ([110], [132], [148]). O custo de instalação elevado desta solução é uma das razões para o seu baixo desempenho económico. Assim, esta medida não foi incluída na avaliação ambiental. As janelas originais foram mantidas inalteradas em todos os pacotes analisados. A Tabela 4.21 mostra as necessidades de energia de aquecimento calculada para os três locais.

Tabela 4.21. Necessidades de energia útil para aquecimento [kWh/(m².a)] por espessuras de isolamento [mm] da cobertura e das paredes exteriores, por regiões de Portugal.

<i>Componente</i>	<i>Espessuras de isolamento [mm] para região Norte - 1924 GD</i>									
<i>Cobertura</i>	0	0	0	40	40	40	40	60	80	
<i>Paredes exteriores</i>	40	80	120	40	80	100	120	0	0	
<i>Energia [kWh/(m².a)]</i>	98,55	94,65	92,99	70,82	66,98	66,03	65,35	87,42	85,61	
<i>Componente</i>	<i>Espessuras de isolamento [mm] para região Centro - 1304 GD</i>									
<i>Cobertura</i>	0	0	0	40	80	100	40	40	140	
<i>Paredes exteriores</i>	0	40	80	0	0	0	40	80	40	
<i>Energia [kWh/(m².a)]</i>	71,99	59,09	56,57	53,90	50,75	49,98	41,28	38,84	36,54	
<i>Componente</i>	<i>Espessuras de isolamento [mm] para região Sul - 987 GD</i>									
<i>Cobertura</i>	0	0	0	40	40	60	80	100	100	
<i>Paredes exteriores</i>	0	40	60	40	80	0	0	0	40	
<i>Energia [kWh/(m².a)]</i>	43,56	35,59	34,62	23,69	23,13	31,17	30,45	29,98	22,28	

A Figura 4.28 mostra os impactos ambientais para pacotes que incluem Caldeira a Gás (CG). O melhor nível de isolamento das paredes exteriores (ponto de inflexão do ciclo de vida) varia entre 50 (987 GD) e 130mm (1924 GD) e níveis ótimos de isolamento da cobertura entre 20 (987 GD) e 120mm (1304 GD). Além disso, impactos incorporados são responsáveis entre 40% (1924 GD) e 80% (987 GD), enquanto a energia final impacta entre 20% (987 GD) e 60% (1924 GD). No entanto, os impactos incorporados compensam os impactos de energia final em todos os pacotes de reabilitação energética em 987 GD, enquanto em 1304 GD isso só ocorre naqueles com isolamento das paredes exteriores. Para 1924 GD, os impactos de energia final sempre compensam os impactos incorporados.

O transporte responde a cerca de 7% (1304 GD) a 12% (987 GD) dos impactos incorporados. Uma linha de tendência polinomial de segunda ordem (garantindo-se uma correlação de cerca de 98%) foi usada para impactos totais no ciclo de vida (CV) em todas as localidades para avaliar os pontos de inflexão do ciclo de vida das estratégias de reabilitação energética selecionadas (tanto fixando o nível isolamento da cobertura e variando o nível de isolamento das paredes exteriores, como o contrário).

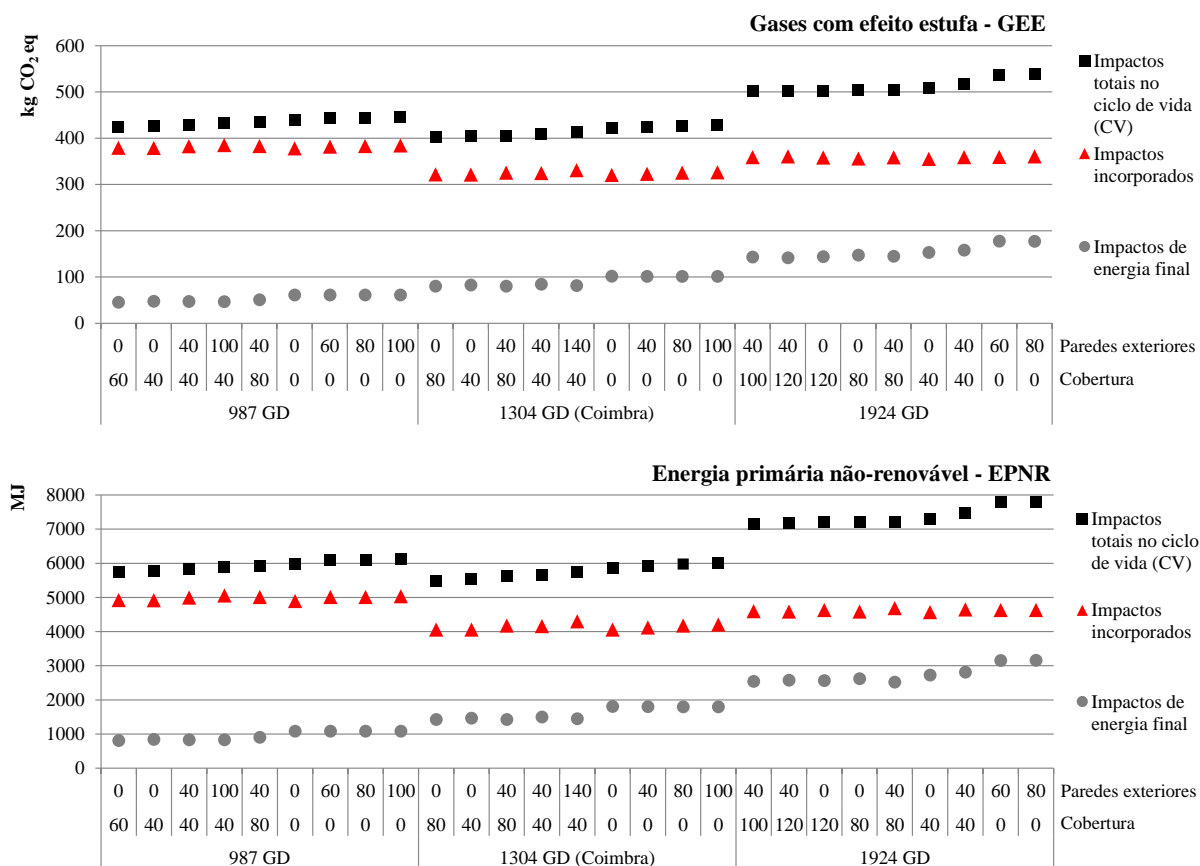


Figura 4.28. Emissões de gases com efeito estufa e impactos de energia primária não-renovável de pacotes de reabilitação energética com pacotes selecionados para CG (fonte: Tadeu [131]).

Nota: Emissões GEE e impactos EPNR para espessuras dos isolamentos da cobertura somados aos das paredes exteriores, em três localidades (987, 1304, e 1924 GD), por unidade funcional (um metro quadrado de área de estar ao longo de um período de 30 anos).

Os resultados para 987 GD mostram que as espessuras de isolamento ótimas (ponto de inflexão do ciclo de vida) variam entre 20 e 30mm (cobertura) e entre 50 e 70mm (paredes exteriores). Os impactos incorporados para 987 GD correspondem a cerca de 60 a 70% dos impactos totais no CV (que variam entre categorias). Além disso, as emissões de GEE incorporadas compensam os impactos de energia final em todas as estratégias de reabilitação. Os benefícios ambientais (redução no impactos totais no CV) são muito baixos (redução de cerca de 3%), para espessuras superiores a 60mm (para ambos, cobertura e paredes exteriores).

Os resultados para 1304 GD mostram que as espessuras de isolamento ótimas (ponto de inflexão do ciclo de vida) variam de 100 a 120mm (cobertura) e de 50 a 80mm (paredes exteriores). Os impactos incorporados para 1304 GD representam cerca de 30 a 50% dos impactos totais no CV (que variam entre categorias). Além disso, as emissões de GEE incorporadas compensam os impactos de energia final em todas as estratégias de reabilitação contendo isolamento de paredes exteriores. Os benefícios ambientais (redução nos impactos totais de CV) são muito

baixos (redução de cerca de 5%), para espessuras superiores a 80mm (para ambos, cobertura e paredes exteriores).

Os resultados para 1924 GD mostram que as espessuras de isolamento ótimas (ponto de inflexão do ciclo de vida) intervalo de 80 a 100mm (cobertura) e de 100 e 130mm (paredes exteriores). Os impactos incorporados para 1924 GD representam cerca de 35 a 60% dos impactos totais no CV (variando entre as categorias), enquanto a energia final contabiliza 40 a 65%. Além disso, os impactos de energia final em GEE e EPNR compensam os impactos incorporados em todas as estratégias de reabilitação. Os benefícios ambientais (redução no impactos totais no CV) são muito baixos (redução de cerca de 3%), para espessuras superiores a 80mm de paredes exteriores e 120mm, na cobertura.

Uma análise de sensibilidade realizada para os diferentes sistemas de aquecimento mostra que, embora AC apresente menores necessidades de energia final (25 a 30% a menos) do que CG, esta leva a uma redução das emissões de GEE (cerca de 60%) em comparação com o AC, bem como a um menor impacto em energia primária não-renovável (40%). Estas diferenças devem-se à eficiência dos sistemas, bem como aos respetivos fatores de conversão de energia primária para eletricidade e gás natural.

4.2.4 Conclusões do caso de estudo II

Este caso de estudo implementa uma avaliação integrada ambiental e económica de pacotes de reabilitação energética para um edifício histórico localizado no centro de Coimbra, Portugal (área recentemente classificada como Património Mundial da UNESCO). Este edifício é representativo dos edifícios pertencentes ao parque imobiliário Português de centros antigos e data de finais do século XIX. Foram selecionados pacotes de eficiência energética, combinando diferentes medidas, a partir de uma avaliação económica preliminar e avaliados os impactos em termos de gases com efeito estufa e de energia primária não-renovável foram.

Foi realizada uma avaliação paramétrica combinando diferentes níveis de isolamento da cobertura, paredes exteriores e pavimento, com substituição de janelas, de sistemas de aquecimento e de preparação de AQS, em diferentes localidades. As variáveis avaliadas foram a resistência térmica dos componentes da envolvente do edifício (em função da variação das espessuras de isolamento), a eficiência do sistema de aquecimento e preparação de AQS, a localização (variação de GD e radiação solar) e custo do isolamento. As necessidades de energia útil foram calculadas usando tanto o método sazonal como o método de simulação de dinâmica. Um padrão médio de ocupação, representativo de edifícios residenciais portugueses, foi definido no modelo de simulação dinâmica.

A análise económica foi realizada de acordo com o método demonstrado no capítulo 3, o qual atende às recomendações da Comissão Europeia para o cálculo de níveis ótimos de rentabilidade de soluções [10] e foi feita uma comparação com os requisitos mínimos de desempenho energético de edifícios, em Portugal [16]. Este método tem como funções objetivo

a redução do custo global e a diminuição das necessidades de energia primária, o que leva a um melhor retorno sobre o investimento e reduz os impactos ambientais. Foi realizada uma análise de sensibilidade para avaliar a variabilidade de necessidades de energia útil, preços de energia e da taxa de desconto.

Verificou-se que as espessuras de nove pacotes de reabilitação energética selecionados para cada localidade, a partir dos níveis ótimos de rentabilidade, variam entre 0 e 140mm (considerando o limite inferior dos preços de isolamento praticados no mercado Português). No entanto, onde o clima é ameno, como na maior parte do território Português, não há vantagem em utilizar espessuras superiores a 80mm. A variação de preços (de limite inferior para limite superior) influencia a rentabilidade dos pacotes de reabilitação energética e isso requer reavaliação constante para alcançar o retorno esperado sobre o investimento.

Registe-se que apenas o aumento do custo de energia não é suficiente para alterar significativamente os pacotes de rentabilidade ótima. Os resultados da avaliação económica revelaram que, em primeiro lugar, existe uma correlação entre a taxa de desconto e a evolução dos preços da energia que é importante para a viabilidade dos investimentos em medidas de eficiência energética. Em segundo lugar, os preços de energia mais baixos combinados com estimativas de taxa de desconto mais elevadas (por exemplo $FIN = 12\%$) desencorajam o investimento em pacotes com menores necessidades de energia primária. Em terceiro lugar, o custo do isolamento [€/r], e custo de operação de sistemas aquecimento e preparação de AQS [€/kWh] e sua correspondente eficiência influenciam diretamente o desempenho do pacote de reabilitação energética. Finalmente, os custos de energia, significativamente mais elevados na perspetiva financeira devido a impostos e taxas, pode incentivar o investimento em reabilitação energética na perspetiva do investidor, visando tirar proveito de economias de energia.

Níveis extras de isolamento em climas amenos (edifícios com menores necessidades de energia) pode levar a maiores impactos incorporados, sem reduzir significativamente a energia útil, resultando em maiores impactos totais do ciclo de vida. Assim, um ponto de inflexão ocorre quando os impactos totais do ciclo de vida são minimizados (apresentando um limiar de nível de isolamento).

Os resultados da análise ambiental do ciclo de vida mostram que cada localidade teve um limiar diferente do nível de isolamento que minimizasse os impactos totais no CV. O nível ótimo de isolamento das paredes exteriores (ponto de inflexão do ciclo de vida) variou de 50 (987 GD) a 120mm (1924 GD) e nível ótimo de isolamento da cobertura variou de 20 (987 GD) a 80mm (1304 e 1924 GD). Estas gamas limiares de isolamento também estão dentro dos níveis ótimos de rentabilidade. Além disso, os impactos incorporados são responsáveis por 35% (1924 GD) a 70% (987 GD), enquanto impactos de energia final representam 30% (987 GD) a 65% (1924 GD). Os locais com maiores necessidades de energia apresentaram limiares mais elevados de nível de isolamento. Menores necessidades de energia final levam a maiores impactos incorporados. Edifícios com baixo consumo energético oferecem mais oportunidades para reduzir a sua carga incorporada ambiental.

O caso de estudo mostrou que o isolamento extra, isto é, espessuras de mais de 80mm, não proporciona um impacto ambiental significativamente mais baixo ou redução do custo global. Além disso, apesar de edifícios históricos em Portugal não terem que cumprir com requisitos energéticos para construção, uma economia significativa de energia pode ser alcançada sem afetar negativamente o seu carácter histórico ou arquitetónico. Concluiu-se também que os custos económicos e ambientais podem ser minimizados pela escolha das medidas eficiência energética mais adequadas de reabilitação energética.

É de salientar que a opção pelo estudo deste tipo de edifício não se deu, simplesmente, pelos benefícios intrínsecos do aporte de conhecimento numa área da reabilitação onde a maior parte das legislações nacionais decide estabelecer regime de exceção e conceder tratamento diferenciado. Surgiu também com o intuito de estudar a rentabilidade dos investimentos em eficiência energética e de uso de fontes de energia renováveis em ambiente aparentemente desfavorável e restritivo. Como tais iniciativas se mostram economicamente sustentáveis neste cenário, onde existem limites inerentes à classificação do edificado, parte-se do princípio de que também são viáveis na renovação de construções que permitem o emprego de maior diversidade de técnicas e soluções de reabilitação [131].

4.3 Caso de estudo III – percepção em relação à reabilitação energética de edifícios

4.3.1 Introdução

A consciencialização dos usuários em relação aos benefícios da reabilitação energética de edifícios está principalmente relacionada com o retorno mensurável do investimento de cada medida de eficiência energética. A avaliação ambiental e económica dos benefícios depende da qualidade da informação (que geralmente tem que ser coletada caso-a-caso). No entanto, na ausência de dados, as decisões tendem a ser adiadas ou tomadas no plano subjetivo.

Este caso de estudo desenvolve-se no sentido de avaliar a preferência de moradores em relação a medidas de eficiência energética para aplicação em edifícios residenciais portugueses, seguindo critérios de rentabilidade. Foram criadas seis alternativas para o edifício de referência e apresentadas a vinte e cinco entrevistados. Essas alternativas englobam uma variedade de combinações de medidas de eficiência energética que alteram quatro elementos (isolamento, janelas, sistemas de aquecimento e preparação de AQS, além da adoção de sistemas baseados em fontes de energia renováveis). O edifício de referência é representativo do parque habitacional construído entre 1961 e 1990, o qual também tem um elevado potencial para melhorar a eficiência energética.

Dois métodos multicritérios MCDA (*Multi-Criteria Decision-Aiding*) [149] foram utilizados para identificar as preferências dos decisores: um método MAVT (*Multi-Attribute Value Theory*) [150], e o método PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) [151]. Cada um destes métodos estabeleceu um *ranking* das alternativas avaliadas.

No total, este estudo analisa os resultados de quatro *rankings* de medidas de reabilitação energética: *Spontaneous* (obtido através de simples ordenação das alternativas pelos entrevistados), *MAVT*, *PROMETHEE* e *Cost-Optimal* (classificação de acordo com os entrevistados, após terem sido informados sobre a análise de rentabilidade, de acordo como o Regulamento Delegado n.º 244).

4.3.2 Descrição do edifício e medidas de reabilitação

O edifício de referência foi criado utilizando-se dados estatísticos fornecidos pela Agência para a Energia de Portugal (ADENE) [49]. Foram também utilizados os dados estatísticos fornecidos pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) e Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) [17]. As dimensões do edifício referência são indicadas na Tabela 4.22. e correspondem a medições obtidas pelo interior do edifício. O edifício virtual utilizado para o estudo é uma unidade habitacional unifamiliar de tipologia T3. Este edifício possui um sistema técnico para aquecimento com eficiência nominal de 1,00 e um sistema para preparação de AQS com eficiência nominal de 0,60.

Tabela 4.22. Características dimensionais do edifício de referência.

A_f (área do pavimento)	100 m ²
h (pé-direito)	2,70 m
A_e (área da envolvente)	93 m ²
A_w (área das janelas)	15 m ²
A_r (área da cobertura)	100 m ²

Os seus parâmetros térmicos, nomeadamente o coeficiente de transmissão térmica U , o fator solar dos envidraçados g_w , e a taxa de renovação horária rph , encontram-se expressos na Tabela 4.23. As janelas são em madeira e compostas por vidros simples com fator solar g_w de 0,85 e um valor de transmissão térmica U de 4,10 [W/(m².°C)]. Os dispositivos de sombreamento são assumidos como sendo cortinas coloridas claras de tecido fino com um fator solar de 0,38.

Tabela 4.23. Características térmicas do edifício de referência.

U_r	2,80 W/(m ² .°C)
U_e	1,30 W/(m ² .°C)
U_f	1,65 W/(m ² .°C)
U_w	4,10 W/(m ² .°C)
g_w	0,85
rph	0,4 h ⁻¹

Na AES, a opção de isolamento considerada foi o poliestireno expandido (EPS), para a aplicação de isolamento térmico no exterior da fachada (minimizando as pontes térmicas planas) e sob a laje de cobertura. Considerou-se a condutibilidade térmica do material igual $0,036 \text{ [W/(m}\cdot\text{°C)]}$. Ao seu custo médio de € 2,30 por resistência térmica unitária $[\text{€/r}]$ foi somado o valor de $17 \text{ [€/m}^2\text{]}$ que representa os custos de aplicação, composto por mão-de-obra e acessórios. Não foi considerada a aplicação de isolamento no pavimento.

A AES também indicou a janela em PVC (policloreto de vinil) como opção mais adequada, assim como o sistema de Ar Condicionado (AC) para aquecimento, alternativas estas mais aceitáveis para o edifício estudado. Um volume total de 160 litros por dia (40 litros por pessoa) foi assumido para preparação de AQS. Levando-se em consideração o impacto do perfil de ocupação do edifício, na SDE optou-se por aplicar percentual de 20% a cada um pacotes de medidas, como fator de redução de consumo das necessidades nominais de energia útil para aquecimento, inicialmente identificadas pelo método sazonal. Ou seja, as referidas necessidades foram multiplicadas por 0,2.

A SRM considerou pacotes de reabilitação energética que combinam alternativas de isolamento térmico (incluindo a opção sem isolamento) para a cobertura (2) e paredes exteriores (2), substituição ou não de janelas (2), a utilização de diferentes sistemas para aquecimento da área habitável (2), mais opções para utilizar ou não FER (3).

O cálculo foi realizado utilizando-se os dados climáticos para 1570 GD, caracterizando a zona climática de inverno I2 de acordo com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) [16]. As necessidades de arrefecimento foram novamente assumidas nulas.

A avaliação paramétrica resultou em **48** combinações de medidas calculadas para a localidade, das quais foram selecionados somente **5** pacotes de reabilitação energética, mais o cenário **BAU**.

A SRM considerou taxa de desconto de 6% somente para perspectiva financeira e um ciclo económico de 30 anos. Tendo em vista o objetivo específico do estudo, com foco num cenário hipotético de reabilitação imediata, não foi realizada a ASP.

Foi definida a espessura de isolamento de 80mm para a cobertura e 60mm para paredes exteriores, o que tende a cobrir as necessidades básicas para o apartamento, conforme um estudo anterior [132]. Cumpre salientar que o edifício, na sua configuração original, não possui isolamento na envolvente. A janela característica do edifício de referência foi substituída por uma janela em PVC, em alguns dos pacotes. Nesta condição, a janela com vidros duplos (incolores), fator solar de 0,78 e coeficiente de transmissão térmica de $2,61 \text{ [W/(m}^2\cdot\text{°C)]}$.

No que se refere aos equipamentos, além do Emissor Elétrico (EE), já presente no edifício de referência, no cenário de reabilitação energética foi considerada a substituição deste por um sistema caracterizado como de alta eficiência ($\eta = 4,3$), nomeadamente o Ar Condicionado (AC), conforme Tabela 4.24.

Tabela 4.24. Sistemas de aquecimento e preparação de AQS combinados.

<i>h,k</i>	<i>Sistema de Aquecimento</i>			<i>w,k</i>	<i>Sistema de preparação de AQS</i>		
	<i>Equipamento</i>	<i>Combustível</i>	<i>Eficiência</i>		<i>Equipamento</i>	<i>Combustível</i>	<i>Eficiência</i>
<i>h,1</i>	Emissor Elétrico	Eletricidade	1,00	<i>w,1</i>	Esquentador a Gás	Gás	0,60
<i>h,2</i>	Ar Condicionado	Eletricidade	4,30	<i>w,2</i>	Esquentador a Gás	Gás	0,60

Nota: *h,k* identifica cada sistema de aquecimento e *w,k* identifica cada sistema de preparação de AQS, onde *h,1* combina somente com *w,1* e assim por diante.

Foram considerados como sistemas FER o Painel Fotovoltaico (PV) e o sistema Solar Térmico com Termossifão (ST T). Foi analisado o contributo do PV e do sistema de energia solar térmica, individualmente e em combinação de sistemas FER.

O PV foi dimensionado para venda de energia à rede, no regime bonificado previsto na regulamentação portuguesa e com valores de 2014, portanto anteriores à norma atualmente em vigor [45]. Na Tabela 4.25, são apresentados os sistemas baseados em FER.

Tabela 4.25. Sistemas baseados em fontes de energia renováveis (FER).

<i>r,k</i>	<i>Sistema FER</i>	<i>Fonte de energia</i>	<i>Energia produzida</i>	<i>Eficiência</i>
<i>r,1</i>	Solar Térmico de Termossifão	Solar	Térmica	1,00
<i>r,2</i>	Painel Fotovoltaico	Solar	Eletricidade	1,00

Nota: *r,k* identifica cada sistema FER. Foi considerada a combinação entre estes sistemas.

Na Tabela 4.26, são apresentadas as contribuições de FER nos pacotes onde estão inseridas.

Tabela 4.26. Energia produzida pelos sistemas FER ($E_{r,k}$), em [kWh/(m².a)].

<i>Sistema FER</i>	<i>Aquecimento</i>	<i>AQS</i>	<i>Eletricidade</i>
Solar Térmico de Termossifão	---	12,59	---
Painel Fotovoltaico	---	---	54,19

4.3.3 Metodologia para avaliação da perceção

A metodologia aplicada neste estudo envolveu os seguintes passos:

- Identificação das alternativas de pacotes de reabilitação energética para o edifício de referência, realizando-se uma AES e um dFER, assumindo um ciclo de vida de 30 anos [10];

- Estudo do seu desempenho térmico e energético por intermédio de uma SDE, seguindo a norma ISO 13789:2007 [152], EN ISO 13790:2008 [69] e as especificidades da regulamentação portuguesa [16];
- Avaliação do desempenho de cada uma das alternativas nos critérios definidos, a partir de uma perspectiva de rentabilidade ótima (SRM) [10];
- Realização de 25 entrevistas para saber as preferências dos moradores em relação às medidas de eficiência energética aplicados ao edifício de referência.

Os critérios e desempenhos para cada alternativa foram estabelecidos com base em Keeney [153]. O modelo aditivo para aplicação do método MAVT (*Multi-Attribute Value Theory*) e o programa VISUAL PROMETHEE 1.4 foram parametrizados para aplicação baseada no método ELECTRE III (*ELicitation Et Choix Traduisant la REalité*).

As entrevistas foram direcionadas a um grupo de vinte e cinco entrevistados. Foram gerados quatro *rankings*: *Spontaneous*, *MAVT*, *PROMETHEE* e *Cost-Optimal*.

Na fase 1 do ciclo de entrevistas, foi realizada a qualificação do perfil dos entrevistados e foram fornecidas explicações sobre os objetivos do estudo. Foram apresentadas alternativas de reabilitação energética para o edifício de referência, incluindo critérios e respetivos desempenhos. Os entrevistados foram então solicitados ordenar as alternativas conforme a ordem de preferência, gerando assim o primeiro *ranking* (*Spontaneous*).

Na fase 2, foi aplicado o método MAVT, envolvendo as diferentes alternativas de reabilitação energética do edifício de referência, com o objetivo de encontrar uma solução apropriada. Após aplicação dos processos de **bissecção** e de **indiferença** envolvendo *trade-off*, o método gerou, automaticamente, o segundo *ranking* (*MAVT*).

Na fase 3, o software VISUAL PROMETHEE 1.4 foi parametrizado com os coeficientes de escala (k_i) do processo de **indiferença** e com os valores intermédios ($x_{0,5}$) do processo de **bissecção** obtidos na fase 2, gerando o terceiro *ranking* de preferências (*PROMETHEE*).

No final do ciclo de entrevistas, é apresentado um gráfico de rentabilidade ótima elaborado conforme recomendado no Regulamento Delegado n.º 244 [10]. Este gráfico fornece uma visão clara do desempenho das alternativas quando submetidas a duas funções-objetivo: minimizar custos globais de implementação das medidas e reduzir as necessidades de energia primária. Finalmente, os entrevistados, após terem tido conhecimento do referido gráfico, estabeleceram o quarto e último *ranking* (*Cost-Optimal*). Na consolidação dos resultados foram analisadas as diferenças entre as ordenações de preferências proporcionadas pelos dois métodos e os demais *rankings*.

4.3.3.1 Parametrização do modelo aditivo - MAVT

No método MAVT, as preferências dos entrevistados foram quantificadas pelas funções de valor (ou utilidade) e pelos coeficientes de escala atribuídos a cada critério [154]. Esta teoria assume que todos os estados são comparáveis e que existe transitividade na relação de preferência e indiferença [155]. Foi utilizado o modelo de agregação aditivo, representado pela equação.

$$V(a) = \sum_{i=1}^n k_i v_i(a_i) \quad (57)$$

em que:

$V(a)$ valor total da alternativa a ;

$v_i(a_i)$ função de valor simples que reflete o perfil da alternativa a em relação ao atributo i ;

k_i coeficientes de escala (pesos) atribuídos pelos decisores.

A teoria MAVT assume a existência de uma função de valor baseada na maximização de utilidade. Esta abordagem envolve a construção de funções de valor, $v_i(a_i)$, que permitem um estudo analítico das preferências e julgamentos de valor [156].

A avaliação das funções de valor é uma tarefa complexa e, por isso, os atributos escolhidos para a avaliação e respetivas escalas de valor devem ser claros para os decisores. O processo de bissecção é uma das técnicas mais usadas para atribuir uma escala da função de valor. Neste método é pedido ao decisor que escolha dois valores extremos de certa escala atribuída ao critério em análise, sendo correspondente ao valor mais ou menos preferido pelo decisor.

No modelo usado, a escala de atratividade relativa definida é um intervalo que quantifica a atratividade de cada alternativa, assente em julgamentos subjetivos com correspondência a uma escala ordinal.

No entanto, de acordo com Keeney [153], é necessário ter em consideração que os valores atribuídos a cada alternativa em cada critério devem estar relacionados com pontos de referência. Neste caso os valores de referência foram do valor 0 (pior valor) ao 10 (melhor valor), com diferenças de valor de 2,5.

De seguida, foi perguntado a cada entrevistado qual o valor intermédio, $x_{0,5}$, entre os dois valores definidos anteriormente, sendo obtido desta forma o valor que deu a mesma satisfação ao decisor movendo-se do pior valor para o intermédio ou do intermédio para o melhor valor.

Posteriormente, a mesma lógica foi seguida para obter os níveis $x_{0,25}$ e $x_{0,75}$. Através dos valores de escala foi desenhada uma curva que passa pelos pontos determinados com o decisor.

Esta abordagem foi realizada com a ajuda de um gráfico onde a curva pode ser ajustada interactivamente com o decisor em tempo real [156].

Outro ponto decisivo foi a determinação dos coeficientes de escala, k_i , que podem ser estimados de várias formas, sendo que neste estudo foi utilizado o processo de indiferença envolvendo *trade-off*. Nesta técnica são mostradas ao decisor duas opções entre duas alternativas, sendo que uma das alternativas apresenta o valor máximo e a alternativa um valor inferior, pretendendo-se que o decisor se veja num problema de *trade-off*.

Deste modo, foi pedido ao decisor que ajustasse os valores das duas opções até atingir um equilíbrio, correspondendo à ordem de indiferença do decisor. Este processo foi realizado para todas as alternativas em estudo, mas a alternativa *Investment* foi sempre usada como base de comparação.

Logo, foram determinados os *swings* equivalentes aos *trade-off* entre as alternativas em estudo e a soma dos *swings*. Os coeficientes de escala foram calculados pela razão entre os *swings* de equivalência de cada alternativa e a soma de todos os *swings*.

4.3.3.2 Parametrização do modelo de prevalência - PROMETHEE

O PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) é uma análise multicritério que se baseia no conceito de prevalência (*outranking*) [156]. Consiste numa variante do método ELECTRE III, a qual integra limiares de indiferença e de preferência para modelar opções de decisão.

Este método utiliza ferramentas de análise de sensibilidade, nomeadamente na atribuição de pesos aos critérios, permitindo aos decisores observar até que ponto as alterações nos pesos têm impacto nos *rankings* produzidos pelo método de avaliação multicritério. Ao fazer uso de apenas um índice de concordância, introduz ainda uma ordem de prevalência progressiva, aproximando-se da forma de pensamento à qual estamos mais familiarizados quando queremos estabelecer uma ordem de preferência.

O princípio subjacente a este método é a comparação de alternativas, não sendo necessário definir se uma é boa e a outra má, mas sim ordenar da melhor para a pior, em termos de desempenho nos vários critérios de avaliação. É possível, deste modo, construir um *ranking* de preferências.

Quando se comparam duas alternativas a e b , surgem normalmente três tipos de relação:

- Preferência: $a \mathbf{P} b$ ou $b \mathbf{P} a$
- Indiferença: $a \mathbf{I} b$
- Incomparabilidade: $a \mathbf{R} b$

Para além da tabela de desempenhos das alternativas em cada critério de avaliação, o método PROMETHEE requer informação adicional, referente às prioridades e preferências do decisor. Para modelar as relações de preferência dos decisores, são:

- Atribuídos pesos aos critérios de avaliação que traduzam a importância relativa que o decisor atribui a cada um, ou seja, as suas prioridades;
- Aplicadas funções de preferência (ou funções de valor) que traduzam a percepção de escalas do decisor, em relação aos limiares de indiferença e de preferência para cada critério de avaliação.

As funções de preferência são construídas sempre tendo como base *pairwise comparison*, tendo em conta os respetivos desempenhos e suas diferenças de valor em cada critério. As funções de preferência vão traduzir a diferença entre a avaliação de duas ações num determinado critério em termos de grau de preferência, medida entre 0 e 1, onde o valor 0 indica que não há preferência de todo, e o 1 significa uma preferência indiscutível.

A função de valor define-se entre o valor Q (limiar de indiferença) e o valor P (limiar de preferência), valor a partir do qual se define uma preferência explícita, conforme Figura 4.29.

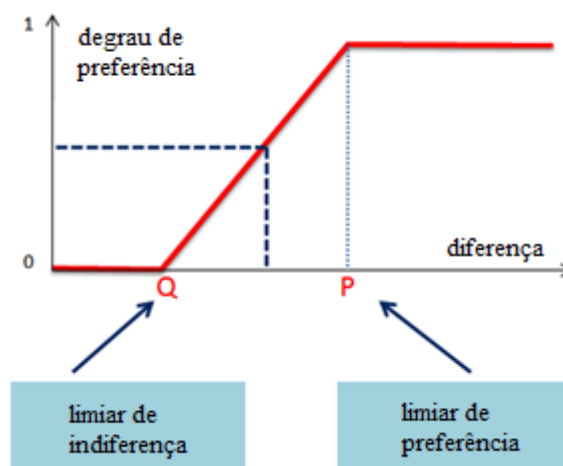


Figura 4.29. Definição da função de preferência no método PROMETHEE

Existem seis tipos de funções de preferência que se podem utilizar no âmbito da aplicação do método PROMETHEE. As funções *Usual*, *U-shape* e *Level* são utilizadas para critérios qualitativos, enquanto as funções *Linear*, *V-shape* e *Gaussin* são mais adequadas na avaliação de critérios de natureza quantitativa.

A função π definida pela preferência P_j e um peso w_j é calculada para cada critério j . Esta função traduz a relação de preferência multicritério de a sobre b (ver Equação 58).

No final, o programa apresenta um *ranking* obtido através das respostas fornecidas pelos entrevistados.

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k w_j P_j(a, b) \quad (58)$$

Este método tem como desvantagem o facto de não ter associado um processo claro de como definir pesos, além de ser muito difícil e complexo atribuir as funções de preferência a cada decisor [157].

Com o objetivo de utilizar os mesmos pesos atribuídos anteriormente pelos entrevistados no método MAVT, a variável *weight of preferences* do PROMETHEE foi parametrizada com os valores obtidos na determinação dos coeficientes de escala, k_i , durante o processo de indiferença envolvendo *trade-off*.

Também de forma a equalizar os valores de P (limiar de preferência), foram adotados os valores intermédios, $x_{0,5}$, obtidos anteriormente no processo de bissecção, no método MAVT. Uma vez que são avaliados somente critérios de natureza quantitativa neste estudo, foi adotada a função *V-shape* para todos eles, mais adequada a este propósito, o que torna o valor Q (limiar de indiferença) não aplicável.

4.3.3.3 Critérios e desempenhos

Na definição do problema, foram escolhidos quatro critérios quantitativos: valor do **investimento** inicial, redução da **fatura de energia**, valor equivalente ao uso de energias **renováveis** e **emissões** de gases com efeito estufa.

Através do organograma de decisão apresentado na Figura 4.30, é possível observar, de forma simples, a relação entre objetivo, critérios e alternativas de reabilitação energética.

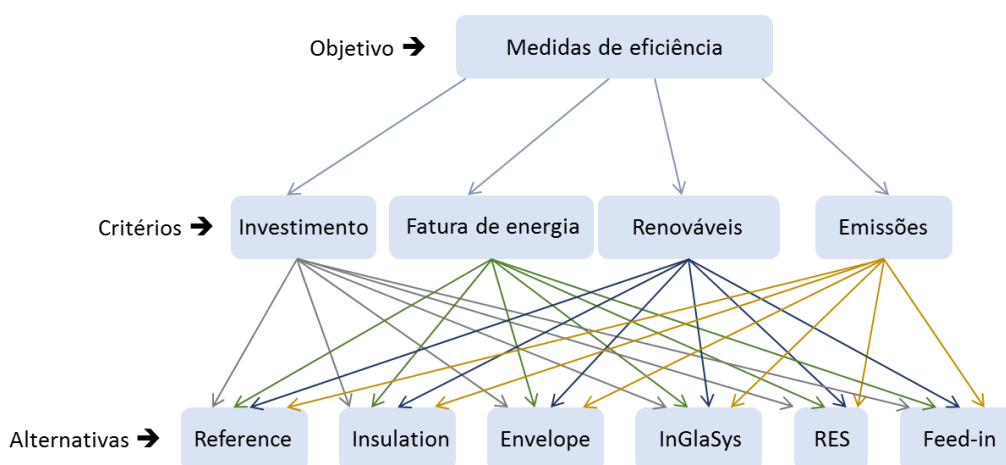


Figura 4.30. Definição do problema em estudo, critérios e alternativas em avaliação.

O valor do **investimento** consiste no desembolso de capital em euros no ato da implementação das medidas, ou seja, o investimento inicial. Tende a expressar a capacidade de investimento do entrevistado.

A **fatura de energia** expressa o gasto mensal em euros com aquecimento da área habitável e preparação de AQS, exclusivamente. Na alternativa *Feed-In*, a conta de energia aparece como negativa (ver a Tabela 4.27) devido à contribuição dos painéis fotovoltaicos vendendo energia à rede de fornecimento. Este critério tende a expressar o interesse do entrevistado em poupar.

As **emissões** de gás carbónico são expressas em quilogramas de CO₂ gerados pelo edifício de referência, durante um mês.

O uso de energias **renováveis** é traduzido em valores monetários, apenas para facilitar a noção desta grandeza por parte do entrevistado. Seu valor representa a quantidade equivalente de energia em euros que está sendo produzida pelos sistemas baseados em FER. Não entra em conflito em relação aos critérios de conta de energia ou emissões, tão pouco é redundante, pois tende a expressar a importância que o entrevistado atribui à postura ecologicamente correta e razões de imagem (por exemplo, perante os vizinhos), fazendo com que este critério adicional atenda ao que propõe Keeney [153].

O facto do edifício de referência ter uma área de 100 [m²] facilita a comparação que os entrevistados fazem com os edifícios onde vivem, corroborando para que as respostas fornecidas sejam mais próximas da realidade.

4.3.3.4 Alternativas de pacotes de reabilitação energética

Cinco pacotes de reabilitação energética mais o cenário BAU (não fazer nada) foram selecionados para servirem de alternativas aos entrevistados. Foi utilizado o Sistema de Eficiência Energética em Edifícios ($\$e^3$) para o estudo das alternativas, na perspetiva financeira. As alternativas apresentadas aos entrevistados foram:

- *Reference*: Representa o edifício de referência sem alterações. O custo equivalente do investimento inicial é de € 3078. Apresenta uma fatura média mensal de energia de € 71, somente para aquecimento da área habitável e para águas quentes sanitárias (AQS). Este consumo de eletricidade, durante um mês de uso da habitação, equivale a emissões médias de CO₂ de 127 [kg] (total de emissões de CO₂);
- *Insulation*: Corresponde a uma moradia *Reference* que recebeu medidas de melhoria de isolamento. O custo de investimento inicial é de € 10.476. Apresenta uma fatura média mensal de energia de € 45. Este consumo de eletricidade durante um mês de uso da habitação perfaz um total de emissões médias de CO₂ de 86 [kg];
- *Envelope*: Moradia *Reference* que recebeu medidas de melhoria de isolamento e envidraçados. O custo de investimento inicial é de € 11.157. Apresenta uma fatura média mensal de energia de € 43. Este consumo de eletricidade durante um mês de uso da habitação equivale a um total de emissões médias de CO₂ de 82 [kg];
- *InGlaSys*: Equivale a uma moradia *Reference* que recebeu medidas de melhoria de isolamento, envidraçados, sistemas de aquecimento e preparação de AQS. O custo de

investimento inicial é de € 12.821. Apresenta uma fatura média mensal de energia de € 29. Este consumo de eletricidade durante um mês de uso da habitação perfaz um total de emissões médias de CO₂ de 57 [kg];

- *RES*: Moradia *Reference* que recebeu medidas de melhoria de isolamento, envidraçados, sistemas de aquecimento e preparação de AQS. Conta com coletores solares térmicos com produção anual de 1.259 [kWh]. O custo de investimento inicial é de € 14.888. Apresenta uma fatura média mensal de energia de € 12. Este consumo de eletricidade durante um mês de uso da habitação perfaz um total de emissões médias de CO₂ de 23 [kg]. A energia renovável produzida no local convertida em [€/mês], tem o valor equivalente de € 9,00 (de acordo com o preço do [kWh], caso fosse vendido à rede, em regime bonificado);
- *Feed-In*: Moradia *Reference* que recebeu medidas de melhoria de isolamento, envidraçados, sistemas de aquecimento e preparação de AQS. Conta com coletores solares térmicos e painéis fotovoltaicos com produção anual de 1.259 [kWh] e 5.419 [kWh], respetivamente. O custo de investimento inicial é de € 24.818. Apresenta uma fatura média mensal de energia de € -18, pois produz mais energia do que consome. Este consumo de energia durante um mês de uso da habitação perfaz um total de emissões médias de CO₂ de 18 [kg]. A energia renovável produzida no local convertida em [€/mês] tem o valor equivalente de € 40,00 (considerando também a eletricidade vendida à rede, em regime bonificado [27]).

A Tabela 4.27 mostra o desempenho das alternativas apresentadas aos entrevistados, nos quatro critérios quantitativos escolhidos (**investimento** inicial, redução na **fatura de energia**, valor auferido com o uso de **renováveis** e **emissões** de gases com efeito estufa).

Tabela 4.27. Tabela de desempenhos das alternativas nos critérios avaliados.

<i>Alternativas</i>	<i>Investimento</i> [€]	<i>Fatura de Energia</i> [€/mês]	<i>Renováveis</i> [€/mês]	<i>Emissões</i> [kg.mês]
<i>Feed-in</i>	24.818	-18	40	18
<i>RES</i>	14.888	12	9	23
<i>InGlaSys</i>	12.821	29	0	57
<i>Envelope</i>	11.157	43	0	82
<i>Insulation</i>	10.476	45	0	86
<i>Reference</i>	3.078	71	0	127

A Figura 4.31 expõe com clareza a posição relativa de cada alternativa nos vetores de impacto ambiental (representado pela necessidades de energia primária) e económico (representado pelos custos globais).

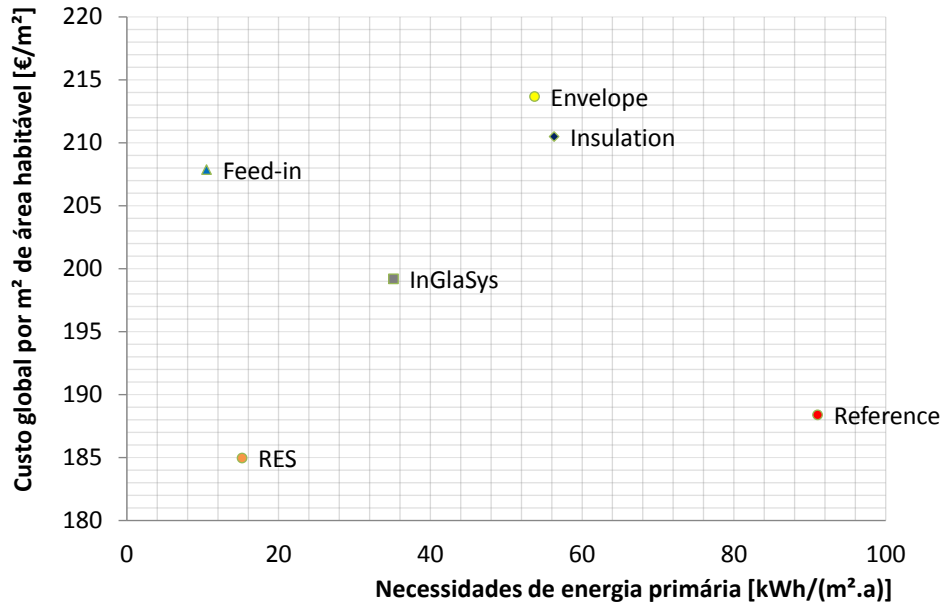


Figura 4.31. Gráfico de rentabilidade, conforme Regulamento Delegado n.º 244.

4.3.4 Aplicação da metodologia e discussão de resultados

Após a obtenção dos quatro *rankings*, os dados foram tabulados através da atribuição de pontos, conforme a ordenação de preferências de cada entrevistado. Desta forma, foram atribuídos 5 pontos para a primeira alternativa de preferência, 4 para a segunda e assim por diante, até 0 para a última alternativa. Estes pontos foram totalizados e resultaram num percentual da pontuação possível, retratando a atratividade de cada alternativa, conforme pode ser observado na Tabela 4.28. Comparando-se o primeiro *ranking* (*Spontaneous*), fornecido pelos entrevistados, e o segundo *ranking* (*MAVT*), estabelecido através das respostas obtidas durante a aplicação do referido método, nota-se uma alteração relevante nas primeiras posições, fazendo com que as alternativas que incorporam energias renováveis se tornem muito mais atrativas, notadamente a alternativa *Feed-in* que assume a preferência. As demais alternativas diminuem a participação percentual no total de pontos, com exceção da alternativa *Reference* que permanece praticamente estável.

Tabela 4.28. Contribuição ([%] do total de pontos) de cada alternativa para cada *ranking*.

Alternativas	<i>Spontaneous</i>	<i>MAVT</i>	<i>PROMETHEE</i>	<i>Cost-Optimal</i>
<i>Feed-in</i>	17,1	32,3	31,7	17,1
<i>RES</i>	23,2	27,5	28,3	30,9
<i>InGlaSys</i>	22,7	18,1	19,7	21,9
<i>Envelope</i>	14,1	8,0	10,4	9,1
<i>Insulation</i>	13,9	5,3	6,4	10,6
<i>Reference</i>	9,0	8,8	3,5	10,4

Quando contabilizados com base na participação percentual no total de pontos, os resultados obtidos pelo método PROMETHEE são muito parecidos com os obtidos pelo método MAVT, mas destaca-se a queda na atratividade da alternativa *Reference*.

O programa VISUAL PROMETHEE 1.4 oferece uma grande variedade de opções de apresentação de resultados, tendo em conta as preferências dos decisores, mas neste trabalho foram exploradas somente algumas dessas funções. Assim, os *rankings* preferencialmente demonstrados são o PROMETHEE I (para um *ranking* parcial) e do PROMETHEE II (para um *ranking* completo). O PROMETHEE I é baseado na computação dos fluxos de preferência Φ^+ e Φ^- . O Φ^+ é uma medida de força, ou seja, ele é representado por uma barra do lado esquerdo com os melhores valores no topo e os piores abaixo. Por sua vez, o Φ^- é uma medida de fraqueza, sendo representado por uma barra à direita, com o melhor valor no topo da barra e o pior abaixo.

A Figura 4.32 apresenta o PROMETHEE I *ranking*, observando-se que a alternativa *RES* apresenta um Φ^- maior, mas com um Φ^+ negativo e abaixo do valor obtido pela alternativa *Feed-in*. Quando comparamos duas alternativas cujas linhas não se cruzam, podemos afirmar que uma prevalece sobre a outra. O *ranking* parcial enfatiza as alternativas difíceis de comparar, quando as linhas se cruzam, permitindo ao decisor dedicar especial atenção a estes casos.

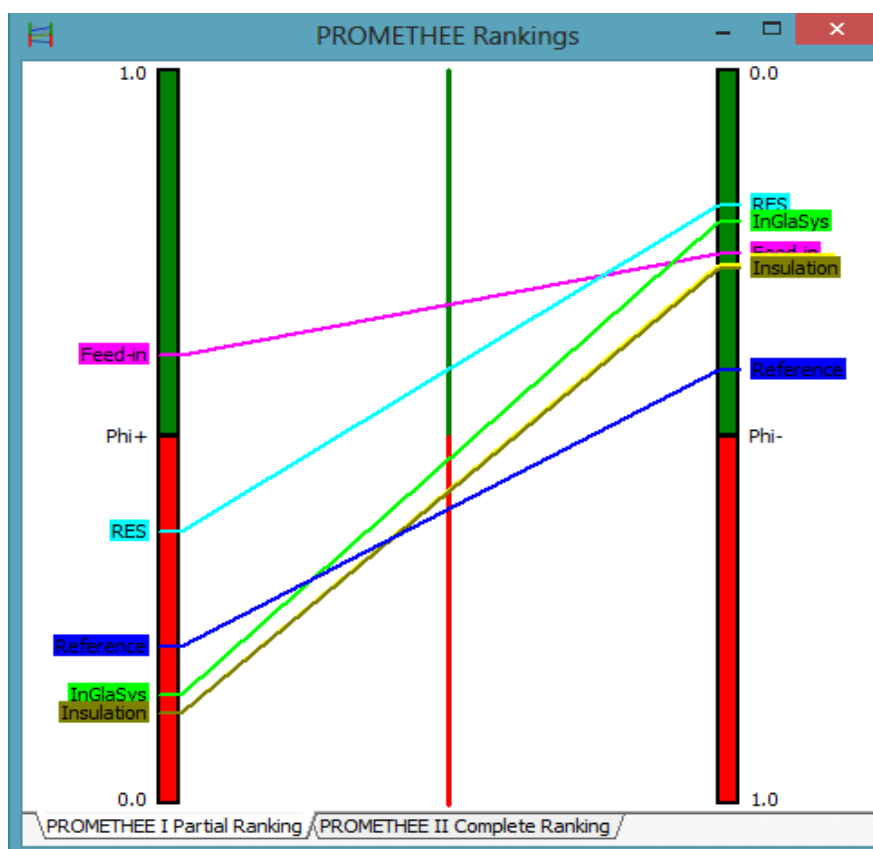


Figura 4.32. *Ranking* parcial obtido pelo método PROMETHEE I representando a colocação das várias alternativas em estudo nos fluxos de preferência Φ^+ (coluna da direita) e Φ^- (esquerda).

Na Figura 4.33 são apresentados os resultados para o PROMETHEE II, onde todas as alternativas são comparadas. O *ranking* completo é baseado na diferença entre os valores de Φ^+ e Φ^- , representados pela barra vertical. É possível observar que a alternativa *Feed-in* é a preferida entre os entrevistados, seguido pela alternativa *RES*. As outras alternativas apresentam valores negativos e muito próximos entre si. No *ranking* completo, a incomparabilidade é excluída sendo por isso menos prudente que o *ranking* parcial, obtendo assim resultados por vezes controversos.

Finalmente, no *ranking* obtido após os entrevistados tomarem conhecimento do gráfico de rentabilidade, *Cost-Optimal*, nota-se a ascensão substancial da alternativa *RES* e a queda da alternativa *Feed-in* para níveis de preferência anteriormente explicitados pelos entrevistados no *ranking Spontaneous*.

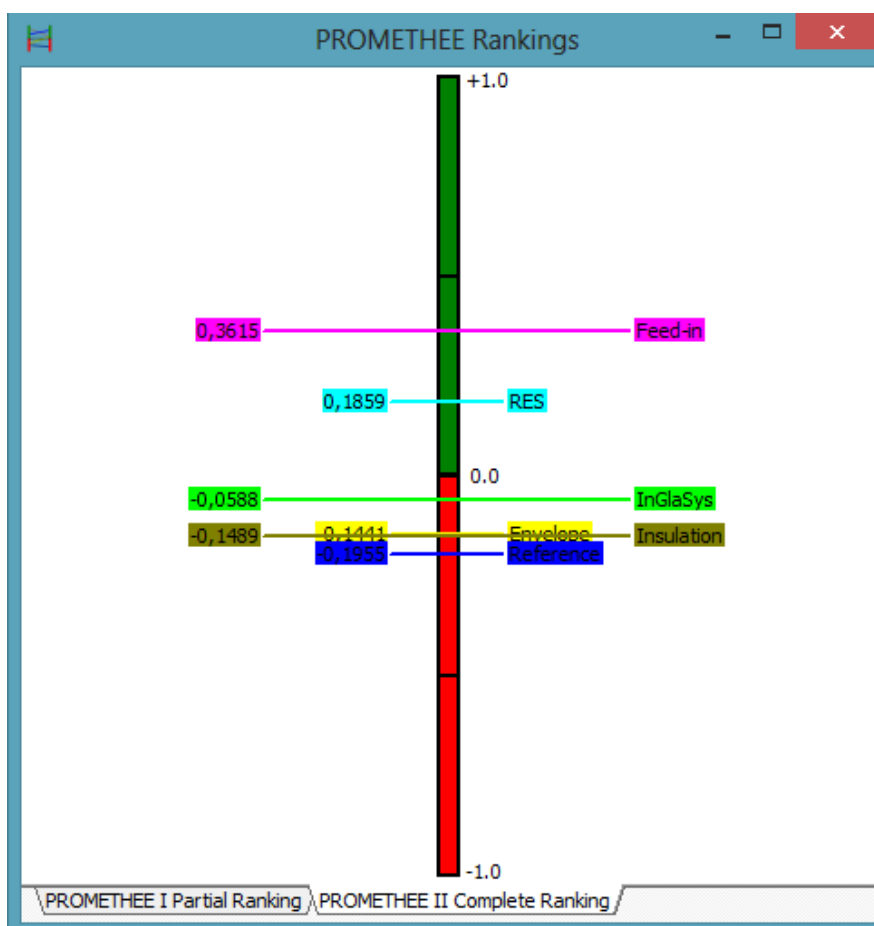


Figura 4.33. *Ranking* completo obtido pelo método PROMETHEE II representando a colocação das várias alternativas em estudo no fluxo de preferência Φ .

Isto denota a efetividade do gráfico de rentabilidade proposto pelo Regulamento Delegado n.º 244 [10], expondo com clareza a posição relativa de cada alternativa nos vetores de impacto ambiental, representado pela necessidade de energia primária, e económico, representado pelos custos globais, conforme já observado na Figura 4.31.

4.3.5 Conclusões do caso de estudo III

Neste caso de estudo foram analisadas as percepções de moradores sobre seis alternativas de reabilitação energética para um edifício de referência, usando os métodos MAVT e PROMETHEE, além da abordagem de rentabilidade ótima (*Cost-Optimal*).

Considerando as respostas de vinte e cinco entrevistados, a alternativa preferida pelos decisores foi o *Feed-in* (mais completa, constituída por melhorias de isolamento, substituição de janelas e sistemas e utilização de energias renováveis), seguida pela alternativa *RES* (similar a *Feed-in*, mas sem painéis fotovoltaicos), em ambos os métodos multicritério. Já na abordagem chamada *Cost-Optimal*, a alternativa preferida foi *RES*, seguida de *InGlaSys* (que inclui isolamento, substituição de janelas e sistemas). Foi possível constatar que:

- A aplicação dos métodos MAVT ou PROMETHEE auxilia no processo de decisão sobre reabilitação energética, destacando a utilidade e os benefícios proporcionados pela adoção de medidas de eficiência, mas os entrevistados mostraram uma tendência de favorecer o desempenho das alternativas que incluem sistemas de energias renováveis;
- O gráfico de rentabilidade proposto pelo Regulamento Delegado n.º 244 [10] é de fácil entendimento e expõe com clareza os vetores básicos para a tomada de decisão, tanto do ponto de vista económico como ambiental. Quando confrontados com o custo global, no período de trinta anos, os entrevistados demonstraram claramente a prevalência deste critério económico sobre o ambiental, embora tenham penalizado a alternativa com menor eficiência energética, *Reference*. Este aspeto foi não detetado pelos métodos MAVT e PROMETHEE;
- Os *rankings Spontaneous* e *Cost-optimal* apresentaram resultados muito similares, o que pode significar que os entrevistados já compreenderam os benefícios da reabilitação energética de edifícios.

4.4 Considerações gerais

Os inúmeros estudos para a avaliação da rentabilidade de investimentos em eficiência energética e o uso de energias renováveis em edifícios demonstram a importância do tema. Seguindo critérios de rentabilidade económica, foi aplicado o método proposto neste trabalho a três casos de estudo e os resultados foram discutidos. Cumpre reiterar que este método está em consonância com a metodologia recomendada pela Comissão Europeia, mas acrescenta ao estudo a abordagem de retorno sobre o investimento e análise das opções reais.

O método é principalmente baseado na seleção de variáveis, a partir de uma análise económica de soluções, além do adequado dimensionamento dos sistemas baseados em fontes de energia renováveis. Para execução dos cálculos, foram utilizados o Sistema de Eficiência Energética em Edifícios ($\$e^3$) e, em alguns contextos, o Algoritmo Genético para Eficiência Energética em Edifícios (AGe^3), sendo simuladas todas as combinações para as soluções selecionadas.

O primeiro caso de estudo avaliou medidas de melhoria, aplicáveis a edifícios de habitação portugueses anteriores a 1960. O edifício de referência é virtual e apresenta grandes oportunidades para reabilitação energética.

Neste estudo apresentou-se uma análise que contemplou 154.000 combinações de soluções para o edifício de referência. Os parâmetros essenciais para a geração dos resultados analisados foram os graus-dias da região onde se insere o edifício e a radiação solar disponível para o mesmo local, o incremento de resistência térmica da envolvente, a eficiência do sistema de aquecimento e o fator de conversão da sua respetiva fonte de energia, dedicando-se especial atenção à variabilidade dos custos de intervenção, nomeadamente de isolamento térmico.

O estudo demonstra que a interação de medidas de isolamento e renovação de sistemas influi diretamente na estratégia de reabilitação energética. Atualmente no mercado português, o investimento em sistemas é mais efetivo do que em isolamento.

O segundo caso de estudo implementou uma avaliação integrada ambiental e económica de pacotes de reabilitação energética para um edifício histórico real, localizado no centro de Coimbra, Portugal. Este edifício é representativo do parque imobiliário Português de centros antigos e data de finais do século XIX.

O comportamento do edifício, frente a medidas de eficiência energética, foi estudado com dados climáticos de diferentes localidades. As necessidades de energia útil foram calculadas usando tanto o método sazonal como o método de simulação de dinâmica. Foi definido um padrão médio de ocupação, representativo de edifícios residenciais portugueses. No final, foi possível constatar que os custos económicos e ambientais podem ser minimizados pela escolha das medidas de eficiência energética mais adequadas de reabilitação energética, sem afetar o valor histórico e arquitetónico de edifícios antigos.

O terceiro caso de estudo analisou as perceções de moradores sobre seis alternativas de reabilitação energética para um edifício de referência, usando os métodos MAVT e PROMETHEE, além da abordagem de rentabilidade ótima (*Cost-Optimal*).

Considerando as respostas de vinte e cinco entrevistados, as alternativas preferidas pelos decisores foram as que incorporavam a utilização de energias renováveis. A aplicação dos métodos MAVT ou PROMETHEE mostrou-se útil no estudo do equilíbrio de forças entre alternativas. No entanto, o gráfico de rentabilidade proposto pelo Regulamento Delegado n.º 244 [10] expôs com maior clareza a prevalência do critério económico sobre o ambiental, o que não foi detetado pelos métodos MAVT e PROMETHEE.

Em linhas gerais, os resultados dos três casos de estudo foram convergentes, demonstrando que existem medidas de eficiência energética viáveis, tanto do ponto de vista económico, como ambiental. Estas opções economicamente viáveis e que atendem requisitos mínimos de desempenho energético para edifícios poderiam ocorrer em maior número, caso houvesse maior oferta de financiamento ou redução do custo de capital para fomentar o investimento em

eficiência energética e o uso de energias renováveis. Neste cenário, uma maior quantidade de pacotes com menor impacto ambiental (inclusive com uso de FER) teria um ROI satisfatório

Uma parte da população já compreendeu os benefícios da reabilitação energética de edifícios, mas necessitam de informações sobre o montante de capital a ser investido e alguma garantia de retorno tangível sobre o investimento em medidas de eficiência energética. Neste contexto, torna-se recomendável considerar necessidades energéticas reais, fazendo com que as potenciais poupanças de energia, advindas da implementação de medidas de eficiência energética, sejam credíveis.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo resume os conhecimentos adquiridos no decurso deste trabalho de investigação. Além das conclusões apresentadas em cada um dos casos de estudo, o presente capítulo recomenda, em linhas gerais, alguns instrumentos que permitem dirigir ações e investimentos públicos e/ou privados relacionados às medidas de eficiência energética e ao uso de fontes de energia renováveis, particularmente em edifícios existentes. No final, são apresentadas as conclusões finais a perspetiva de trabalhos futuros.

5.1 Introdução

Esta tese abordou aspetos políticos, sociais, económicos, ambientais e científicos relacionados com a reabilitação energética de edifícios. Principalmente, pretendeu-se obter uma visão abrangente sobre a rentabilidade do investimento no aumento da eficiência energética e no uso de energias renováveis em edifícios.

No primeiro capítulo estabeleceram-se os limites deste trabalho de investigação e a relevância do tema, bem como se definiram os objetivos do estudo. No capítulo dois explorou-se a relação entre o desenvolvimento sustentável e o uso de energia em edifícios, apontando motivos e estratégias para a reabilitação energética. Foram apresentados relatórios internacionais que debatem o impacto das atividades humanas nas alterações climáticas, destacando a participação do setor de edifícios no consumo de recursos. De seguida, foram analisadas as políticas para este setor, focando as estratégias e a troca de experiências na União Europeia para remoção de barreiras e eliminação de falhas de mercado, visando a promoção da reabilitação energética. Foram discutidos os desdobramentos destas políticas nos Estados-Membros, usando como exemplo o caso de Portugal. No final, foram também apresentados estudos relevantes no âmbito da rentabilidade da reabilitação energética de edifícios.

Foi possível concluir que a promoção da eficiência energética e do uso de fontes de energia renováveis é essencial para a mitigação das alterações climáticas. Na União Europeia, diretivas para a promoção da eficiência energética (EED), do uso de fontes de energia renováveis (RES) e para a melhoria do desempenho energético dos edifícios (EPBD) demonstram uma ação coordenada de políticas e estratégias que têm impacto direto no setor da construção e no uso de edificações. No entanto, estudos recentes ([42], [43]) afirmam que há falta de vontade política para implementar os requisitos mínimos, remover barreiras e encontrar novas medidas. Afirmam ainda que os planos nacionais não têm credibilidade necessária para garantir a redução do consumo de energia final em 1,5% ao ano.

No caso de Portugal, as avaliações do Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e do Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) [15] permitem perceber um desfasamento entre os percentuais de participação no consumo de energia, os esforços exigidos de determinados setores e a repartição dos recursos destinados à promoção

dos programas estabelecidos. O país ainda não transpôs as diretivas na totalidade, mas demonstra ter plenas condições de atingir a sua parcela nas metas europeias, principalmente no âmbito das renováveis.

Especificamente no que se refere à rentabilidade, o Regulamento Delegado (UE) n.º 244/2012 [10] especifica regras para comparação de medidas de eficiência energética e do uso de fontes de energias renováveis em edifícios novos e existentes, mas não é dirigido a investidores ou proprietários de edifícios, quando assumem este papel, o que o torna incompleto em sua abordagem. Portugal ainda não transpôs este regulamento para a legislação nacional.

O conhecimento da regulamentação em vigor e a seleção de estudos relevantes na temática da rentabilidade da reabilitação energética propiciou a fundamentação dos principais conceitos teóricos necessários ao desenvolvimento deste trabalho, representando suporte à investigação, às análises e às reflexões sobre os dados e informações recolhidas. Em especial, verificou-se até que ponto um dos problemas observados, o da complexidade na análise e na tomada de decisão sobre este tipo de investimento, poderia ser explicado e resolvido pelas teorias já construídas e à disposição.

Assim, com base nesta fundamentação teórica, no capítulo três foram formulados conceitos necessários ao estabelecimento de um método para estudos de rentabilidade da reabilitação energética de edifícios. Foram definidas fases de estudo com o objetivo de apresentar uma abordagem alternativa, que se dirija também a investidores e, ao mesmo tempo, auxilie o trabalho dos vários intervenientes. Este método explora as oportunidades de melhoria na abordagem do Regulamento Delegado (UE) n.º 244/2012, sugerindo a inclusão de critérios de avaliação do investimento para que a perspetiva financeira reflita o interesse dos proprietários de edifícios.

Foram realizados estudos preliminares para identificar e testar os parâmetros com maior impacto na rentabilidade. Utilizou-se o exemplo de Portugal para ajustar e validar o modelo. A relação entre os graus-dias de aquecimento e a radiação solar permitiu caracterizar o comportamento das edificações nas diferentes zonas climáticas. Desta forma, foi possível validar o modelo utilizando um número reduzido de localidades simuladas.

A definição do método dedicou especial atenção à variabilidade dos custos e ao conjunto de materiais disponíveis para o isolamento térmico da envolvente de edifícios. No caso das janelas, o resultado económico é influenciado pela interação entre resistência térmica, fator solar do envidraçado e, obviamente, o custo de substituição, consoante a estação em estudo (arrefecimento ou aquecimento). As necessidades de arrefecimento não foram consideradas nesta análise, o que reduziu a influência da substituição das janelas nos resultados preliminares.

O método demonstrou que é possível estabelecer uma equação onde a soma das opções individualmente mais rentáveis pode representar o pacote de rentabilidade ótima. Isto implica que a análise económica de soluções determine, previamente, em qual sistema de aquecimento da área habitável deverá ser realizado o investimento, para atender a uma determinada gama de

necessidades energéticas. Como a variável dos sistemas adquire relevância neste método, foi ilustrada a aplicação de um procedimento expedito para a seleção de sistemas de aquecimento e de preparação de águas quentes sanitárias (AQS), com base em estudos preliminares que exploraram o caso de Portugal.

Algumas conclusões resultaram das validações no modelo e serviram para ilustrar o método. Neste contexto, demonstrou-se que os hábitos de climatização dos portugueses estimados com base em dados estatísticos nacionais, ou seja, os consumos reais de energia útil para aquecimento, são bastante inferiores aos respetivos valores de necessidades nominais estimados através do método sazonal. Esta diferença influencia a quantificação das potenciais poupanças de energia para aquecimento e, por conseguinte, a rentabilidade de medidas.

O método complementou a abordagem da rentabilidade sob o critério do Valor Atualizado Líquido (VAL), propondo também avaliar o investimento sob o critério do retorno sobre o investimento (ROI), bem como analisar as opções reais relativas à reabilitação energética. As opções reais revelam que os proprietários de edifícios podem decidir pelo diferimento (adiamento), abandono, contração, expansão ou troca de determinada solução, conforme o ROI associado a cada pacote de medidas e tendo em conta requisitos mínimos regulamentares.

Foram apresentadas duas ferramentas para implementação dos cálculos previstos no método: o Sistema de Eficiência Energética em Edifícios ($\$e^3$) que realiza o estudo com funcionalidade satisfatória até cerca de 10.000 pacotes de medidas, e o Algoritmo Genético para Eficiência Energética em Edifícios (AGe^3) utilizado para um maior número de combinações e também para selecionar o conjunto aproximado de soluções Pareto eficientes que apresentem menor custo global e menores necessidades de energia primária.

O capítulo quatro apresentou três casos de estudo onde foi aplicado o método proposto, analisando resultados baseados em consumos energéticos e valores reais do mercado português para medidas consideradas adequadas à reabilitação energética. A amostra de resultados foi produzida utilizando-se edifícios teóricos e reais, unifamiliares e multifamiliares, de diferentes épocas de construção, incluindo um cenário onde as características históricas impõem restrições às intervenções. Os resultados foram confrontados com os atuais requisitos mínimos de desempenho energético, aos quais os proprietários de edifícios estão sujeitos.

Especificamente no caso de estudo II e adicionalmente ao método proposto, foi aplicada a metodologia de análise de ciclo de vida (ACV) e foram realizados cálculos pelo método da simulação dinâmica para avaliar impactos ambientais de pacotes selecionados no estudo dos níveis ótimos de rentabilidade. No caso de estudo III, foram ainda utilizados dois métodos multicritérios MCDA (*Multi-Criteria Decision-Aiding*): um método MAVT (*Multi-Attribute Value Theory*), e o método PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) para identificar as perceções de moradores sobre o valor e a utilidade da reabilitação energética de edifícios, fornecendo uma visão do aspeto social que envolve o tema.

5.2 Recomendações para a promoção da reabilitação energética de edifícios

Com base neste trabalho de investigação, é possível destacar alguns aspetos que as autoridades ou os formuladores de políticas devem ter em atenção para efetivamente promover a reabilitação energética de edifícios.

A regulamentação nacional influencia diretamente a rentabilidade das soluções disponíveis para eficiência energética e o uso de FER em edifícios, tendo em vista que os requisitos mínimos exigidos impõem restrições, e os incentivos e subsídios vigentes podem favorecer determinadas medidas. No entanto, embora os pacotes de medidas muito ambiciosas proporcionem grande economia no consumo de energia primária, não se mostram rentáveis, considerando-se a relevância dos investimentos necessários à sua implementação e o retorno financeiro estimado, durante o ciclo de vida do edifício. Assim, a regulamentação em vigor jamais pode impor ao cidadão comum investimentos que não são rentáveis nem mesmo no longo prazo, apesar da argumentação de que tais investimentos podem trazer benefícios ambientais.

Na perspetiva macroeconómica, é necessário avaliar todos os aspetos relacionados com o impacto ambiental das principais soluções disponíveis no mercado e estes não se restringem às necessidades de energia primária e/ou os atuais custos de carbono. As necessidades de energia primária são fortemente condicionadas pelos fatores de conversão estabelecidos e os custos de carbono são atualmente muito baixos. Recomenda-se que seja tida em conta uma criteriosa análise de ciclo de vida (ACV) para as principais soluções disponíveis no mercado. A partir da ACV é possível considerar a energia incorporada nas soluções, bem como o impacto ambiental dos respetivos combustíveis utilizados durante todo o ciclo de vida destas soluções.

Somente depois de se ter uma indicação clara de quais são as soluções mais efetivas, numa análise integrada ambiental e económica, se poderá fazer alterações na regulamentação em vigor. Deve-se ter em conta que estas alterações provocam movimentos no mercado e podem prejudicar ou beneficiar interesses de determinados segmentos. Caso sejam conduzidas de forma inadequada, as alterações na regulamentação podem inclusive aumentar o impacto ambiental. Portanto, sabendo-se que a perspetiva macroeconómica deve defender o interesse comum, uma análise periódica e isenta destas variáveis deve ser conduzida ao nível nacional, de maneira a orientar corretamente as ações e dirigir a distribuição justa dos investimentos públicos. A complexidade dos estudos de rentabilidade, também demonstrada no presente trabalho, exige pessoal qualificado e especialmente dedicado a esta tarefa, além de ferramentas adequadas para que sejam produzidas informações credíveis e de qualidade.

Estas ferramentas podem ser customizadas para auxiliar os principais intervenientes da reabilitação energética de edifícios: proprietários, peritos, fornecedores e autoridades. Assim, métodos para a avaliação da rentabilidade da reabilitação energética de edifícios, tais como o apresentado neste estudo, são oportunos e necessários para otimizar a seleção de soluções e viabilizar o alcance dos objetivos estabelecidos a nível nacional. Todos os intervenientes

envolvidos devem ter acesso a ferramentas adequadas ao seu respetivo interesse específico e ao seu estágio de conhecimento sobre esta temática.

De posse das informações necessárias, os governos podem inclusive planear e oferecer linhas de crédito que reflitam o baixo risco e a rentabilidade do investimento em medidas de economia de energia no momento da construção ou renovação iminente do edifício. As taxas de financiamento podem ser ainda menores do que as praticadas nas hipotecas de longo prazo. Na quantificação dos potenciais fontes de recursos para financiamento público, é importante considerar a eliminação do défice tarifário nos valores cobrados pela energia elétrica. A recente tendência de eletrificação das soluções e o aumento significativo dos níveis de eficiência dos sistemas, exigem uma maior atenção em relação aos custos da energia elétrica. Parte da fatura do cidadão é paga com recursos públicos e isso pode tornar-se um incentivo á eletrificação. Neste contexto, é preciso considerar que a remoção deste subsídio revelará o real custo da eletricidade, o que deve incentivar o investimento em eficiência energética e no uso de FER, uma vez que é a poupança de energia que vai viabilizar ou não este investimento.

Compreende-se que a eliminação deste subsídio é uma medida impopular, ainda mais no caso de países como Portugal, em que o preço da energia já é um dos mais altos da União Europeia [158]. No entanto, o custo de eletricidade na perspetiva macroeconómica é, praticamente, metade do custo na perspetiva financeira, onde o contributo preponderante é dos impostos e encargos sobre os preços de referência. Ou seja, existe uma grande margem na cobrança de impostos e encargos que pode ser manipulada, desde que seja adotada uma estratégia coerente e que privilegie resultados satisfatórios do ponto de vista ambiental, social e económico, mesmo que só ocorram no longo prazo. Este ajuste é necessário porque a correlação entre a evolução estimada dos preços de energia e as taxas de desconto adotadas é crucial para a viabilidade de investimentos em medidas de reabilitação energética. Valores baixos e estimativas de pequenos aumentos nos preços de energia, combinados com taxas de desconto mais altas, tendem a desencorajar o investimento em soluções com baixo consumo de energia e também em tecnologias baseadas em fontes de energias renováveis.

Os fatores de conversão de energia final em primária, por si só, têm grande influência nos cálculos de rentabilidade. Estes fatores são definidos por portaria e podem transformar-se em potentes instrumentos políticos. Considerar fatores inferiores também pode favorecer a eletrificação, o que deve ser equacionado na estratégia de promoção do uso de sistemas baseados em energias renováveis.

Uma vez que se sabe que os Estados-Membros não dispõem de recursos suficientes para financiar todos os investimentos necessários à reabilitação energética, a mudança de cenário somente será possível através do investimento privado e isso não se dá somente por imposição regulamentar, mas sim por convencimento. As autoridades não podem obrigar o cidadão comum a realizar investimentos que as próprias instituições governamentais não fazem, uma vez que o cumprimento dos regulamentos falha até mesmo em edifícios públicos.

O acesso à informação detalhada e atualizada é imprescindível para a precisão das estimativas no que se refere aos custos de materiais, equipamentos e mão-de-obra (para instalação, manutenção e eventual substituição de soluções). A infinidade de informações sobre as tecnologias disponíveis e regulamentos a cumprir confunde o cidadão comum e faz com que as decisões sejam adiadas ou tomadas no plano subjetivo. Este trabalho demonstrou que as pessoas atribuem valor e utilidade ao uso de FER, mas necessitam estar convencidas de que estas soluções, além de diminuírem o impacto ambiental, são também um bom investimento. Assim, cabe às autoridades garantir, à sociedade em geral, acesso às informações de que dispõem, para que os investimentos passem a ser significativos.

Atualmente, os proprietários de edifícios tendem a continuar utilizando as soluções convencionais que conhecem, limitando-se a substituir equipamentos quando param de funcionar. O comportamento BAU (negócio como de costume) dos proprietários de edifícios acaba sendo incentivado também pelo aumento significativo dos níveis de eficiência dos sistemas elétricos. Em alguns cenários de estudo, a simples substituição de um sistema de aquecimento ineficiente por um sistema moderno, a torna a solução de rentabilidade ótima, até mesmo na perspectiva macroeconómica. Isto leva-nos a concluir que a promoção do uso de sistemas baseados em energias renováveis tem falhado. Os resultados demonstraram claramente a importância de mecanismos de incentivo para que esses sistemas se tornem competitivos, tais como subsídios ao regime bonificado que considerem a conexão à rede de fornecimento de energia. A conectividade à rede é importante devido à intermitência característica da produção de energias provenientes de fontes renováveis.

Devido à atual situação de endividamento dos países, é natural que o esforço para disponibilizar linhas de crédito ou implementar benefícios fiscais à utilização de energias renováveis seja menor, o que se tem verificado com as atualizações constantes da legislação aplicada à mini e microprodução. Esta redução de incentivos inibe a implementação destas tecnologias, pois deixam de ser rentáveis no curto e médio prazos. Apesar disso, a indústria tende a adaptar-se e, por exemplo, cada vez mais se produz painéis fotovoltaicos com menores custos e maiores eficiências. O pleno domínio do conhecimento sobre estas variáveis é imprescindível para dirigir investimentos públicos ou privados ao uso de fontes de energia renováveis, particularmente em edifícios existentes e sob a perspectiva macroeconómica.

- **Interações de políticas e possíveis consequências macroeconómicas**

Ainda que sejam cumpridos todos os acordos internacionais para mitigação das alterações climáticas e mesmo considerando-se o cenário de pleno alcance das metas estabelecidas, deve-se ter em conta que a interação entre as políticas pode gerar consequências involuntárias. Ocorre que a sobreposição de motivos para a crescente busca da eficiência energética e do uso de FER em todos os setores e também de políticas promovidas por diferentes jurisdições (local, nacional e internacional) pode criar riscos de "vazamento de carbono". Existe a probabilidade de que políticas implementadas numa jurisdição ou setor reduzam a procura por energia proveniente de combustíveis fósseis e, portanto, os preços destes combustíveis a nível mundial.

Consequentemente pode aumentar a procura por energia fóssil em outras jurisdições ou setores. Este tema é tratado em um dos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) [3].

Mesmo que não ocorra a migração da procura por este tipo de energia, os proprietários de reservas de combustíveis fósseis poderão temer a contínua queda dos preços devido a implementação de políticas para eficiência energética e uso de FER e aumentar a extração destes recursos. Isto obriga a uma coordenação global da aplicação de políticas abrangentes, bem como a atuação através de sinais de preços que penalizem emissões de gases de efeito estufa (GEE). Um cenário de queda global dos preços de combustíveis fósseis e com preços de carbono inferiores pode, potencialmente, levar a maiores emissões de carbono.

Como referido no capítulo 2, a União Europeia (UE) tem como estratégia, para combater este cenário, reduzir o excedente de créditos de carbono disponíveis para negociação no Regime de Comércio de Licenças de Emissões (RCLE-EU), já que os valores fixados para o custo do carbono são considerados baixos e incapazes de incentivar o investimento em projetos “verdes”, de entre eles os baseados em FER. A proposta de lei que cria um sistema de estabilidade através de uma reserva de mercado aponta no rumo correto e tende a fazer com que seu preço não caia demasiadamente.

No entanto, mesmo a perspectiva de futuros aumentos dos preços de carbono pode incentivar os proprietários de reservas de petróleo e gás a extrair recursos mais rapidamente, enquanto os preços de carbono ainda são mais baixos, prejudicando os objetivos políticos tanto para o clima quanto para disseminação das tecnologias baseadas em FER. O IPCC tem reiterado que somente as políticas FER (isto é, sem considerar preço do carbono) não são um instrumento eficaz para reduzir as emissões porque não incentivam suficientemente o uso de todas as opções de mitigação disponíveis, incluindo as tecnologias não-FER de baixo carbono e melhorias de eficiência energética [3].

Se os tomadores de decisão pretendem aumentar a eficiência energética, a participação das energias renováveis e, ao mesmo tempo, agregar metas ambiciosas de mitigação, então compromissos de longo prazo e flexibilidade para aprender com experiências serão primordiais. Sendo o setor de edifícios um dos mais intensos em consumo de energia e, portanto, uma das variáveis com maior influência no alcance do objetivo de se estabilizar os níveis de concentração GEE, com grande participação de fontes de energia renováveis, uma mudança estrutural nos sistemas de energia de hoje será exigida ao longo das décadas seguintes.

Políticas adicionais são necessárias e vão além de investigação e desenvolvimento para suporte à implementação de tecnologias. A criação de um ambiente propício inclui a educação, a sensibilização e o desenvolvimento sistemático das políticas de integração com metas mais amplas, incluindo gestão do uso da água e o planeamento urbano [3].

5.3 Conclusões finais

Para além das conclusões alcançadas no âmbito de cada capítulo, torna-se oportuno acrescentar algumas conclusões finais:

a) O desenvolvimento sustentável implica uma ampla coordenação de políticas e estratégias macroeconómicas que sejam eficazes na defesa do interesse comum. É imprescindível uma postura pró-ativa, tanto do lado desenvolvimentista quanto do lado conservacionista. Para os defensores do desenvolvimento económico, é necessário incorporar mecanismos de avaliação de impacto ambiental ao planeamento. Para os conservacionistas, cabe aceitar a necessidade da coexistência da conservação e do desenvolvimento numa perspetiva de benefício mútuo. Neste sentido, a eficiência energética e o uso de energias renováveis podem fornecer uma série de benefícios à sociedade. Algumas tecnologias já são amplamente competitivas e, de entre as tecnologias que ainda não o são, muitas podem viabilizar-se, caso sejam adotados instrumentos que removam barreiras e eliminem falhas de mercado

b) O investimento em reabilitação energética de edifícios obriga a uma intervenção relativamente complexa para promover o atendimento de critérios fundamentais de desempenho e conforto. O capital necessário a ser empregue é significativo e exige resultados atrativos. A metodologia de avaliação da rentabilidade que está sendo implementada na União Europeia, ainda que em fase embrionária, apresenta potencial para estudo de viabilidade deste tipo de investimento. São necessárias melhorias na referida metodologia de forma a contemplar também o ponto de vista dos investidores/proprietários de edifícios, uma vez que é no setor privado que se concentra o capital necessário para fomentar uma mudança com a magnitude esperada.

Assim, neste trabalho de investigação, a conclusão é que as medidas de eficiência energética e opções ao uso de FER, tecnicamente disponíveis para a reabilitação de edifícios, já evidenciam a sustentabilidade económica deste tipo de investimento, e sempre existirá uma solução inteligente, ambientalmente suportável, socialmente responsável e, ao mesmo tempo, economicamente viável.

5.4 Perspetiva de trabalhos futuros

Estudos futuros devem ser conduzidos na busca de visão ampla da rentabilidade da reabilitação energética de edifícios. Tendo o presente trabalho uma abrangência específica e reiterando a importância do contexto em que surge, sugerem-se alguns trabalhos para desenvolvimento futuro, como por exemplo:

- Aplicação da metodologia empregue neste estudo a diferentes tipologias de edifícios de referência, épocas de construção e localização, com inclusão de sistemas passivos e diferentes sistemas de energias renováveis. Desagregação e monitorização de consumos de energia final com recurso a amostras de dados reais a serem obtidos através de auditorias.

- Estudo da incorporação da análise de ciclo de vida (ACV) na perspetiva macroeconómica, no âmbito do quadro metodológico proposto pela Comissão Europeia. Recomenda-se o desenvolvimento de um método simplificado que possa representar um indicador de impacto ambiental das medidas de reabilitação energética, adicionalmente às necessidades de energia primária e aos custos de emissões de GEE, já contemplados na referida metodologia.
- Maior aprofundamento na comparação entre os resultados obtidos com o método sazonal e os alcançados com simulação dinâmica, com recurso a programas especificamente desenvolvidos para este fim, permitindo assim, estudar com mais pormenor as consequências das diferentes medidas de eficiência energética a aplicar em edifícios, bem como, estudar a influência da inércia térmica, que sendo um fator importante no desempenho térmico dos edifícios, não foi discutida em profundidade, no presente documento.
- Investigação da potencial redução do défice tarifário português por intermédio do investimento na promoção da mini e da microprodução de energia a partir de fontes renováveis, para além do estudo detalhado das taxas de desconto, da evolução dos custos de energia e dos fatores de conversão de energia final em primária a aplicar em Portugal.
- Considerando-se a influência do momento ideal para investimentos, aspetos como o fator de desconto ajustado, decisões fiscais e de financiamento, recomenda-se a incorporação de metodologias financeiras mais precisas em estudos futuros, a fim de dar conta do risco e da incerteza no processo de tomada de decisão dos proprietários dos edifícios.
- Realização de uma investigação ampla sobre a perceção de moradores em relação ao valor e à utilidade da reabilitação energética de edifícios, com recurso a métodos multicritério. Recomenda-se a extensão do modelo aplicado neste estudo a uma grande amostra, com objetivo de mapear o processo decisório dos proprietários de edifícios e estudar em maior detalhe a relação principal-agente, no âmbito desta temática.
- Adaptação e aplicação do método proposto neste trabalho de investigação a outros países, inclusive aos que não fazem parte da União Europeia, de forma a demonstrar a flexibilidade e abrangência dos procedimentos aqui recomendados.

De qualquer forma, estudos devem ser conduzidos no sentido de se alcançar o melhor equilíbrio e o alinhamento de interesses entre as perspetivas macroeconómica e financeira, na reabilitação energética de edifícios.

REFERÊNCIAS

- [1] Brundtland, G., “Our common future,” Oxford University Press, Oxford, 1987.
- [2] Stern, N., “The Economics of Climate Change,” 2007. [Online]. Available: www.sternreview.org.uk. [Acedido em 2015].
- [3] Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S. and von Stechow, C. (eds), “IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation,” Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2011.
- [4] Anderson, D., “Costs and finance of carbon abatement in the energy sector - Paper for the Stern Review,” 2006.
- [5] Comissão Europeia, *The EU climate and energy package*, 2012.
- [6] Comissão Europeia, *Roteiro de transição para uma economia hipocarbónica competitiva em 2050*, Bruxelas, 2011.
- [7] Lapillonne, B. et al, *ADEME – IEE. Energy Efficiency Trends in Buildings in the EU - Lessons from the ODYSSEE-MURE project*, 2012.
- [8] Buildings Performance Institute Europe, *Europe’s buildings under the microscope*, 2011.
- [9] Comissão Europeia, *Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)*, vol. L 153, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 2010, p. 13–35.
- [10] Comissão Europeia, *Regulamento Delegado (EU) N° 244/2012 da Comissão que contempla a diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios, através do estabelecimento de um quadro metodológico comparativo*, vol. L 81, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 2012, p. 18–36.
- [11] Comissão Europeia, *Orientações que acompanham o Regulamento Delegado (UE) n.º 244/2012 da Comissão que complementa a Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios relativa ao desempenho energético dos edifícios*, vol. C 115, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 2012, pp. 1-28.

-
- [12] Brealey, R. et al, *Fundamentals of Corporate Finance - Third Edition*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001.
- [13] Hamdy, M., Hasan, A. and Siren, K., “A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010,” *Energy and Buildings*, vol. 56, pp. 189-203, 2013.
- [14] Direção Geral de Energia e Geologia, *Balanço Energético Sintético*, Portugal, 2014.
- [15] *Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013*, Portugal: Diário da República, 2013.
- [16] Ministério da Economia e do Emprego, *Decreto-Lei 118/2013*, Portugal: Diário da República, 2013.
- [17] Instituto Nacional de Estatística, “Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico - 2010,” Lisboa - Portugal, 2011.
- [18] Instituto Nacional de Estatística - INE, “Pordata - Banco de Dados Portugal Contemporâneo,” 2012. [Online]. Available: <http://www.pordata.pt>. [Acedido em Janeiro 2015].
- [19] Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico - IGESPAR, “Património edificado,” Junho 2013. [Online]. Available: <http://www.igespar.pt/pt/patrimonio>. [Acedido em Junho 2013].
- [20] *Reabilitação de edifícios do Centro Histórico do Porto - Guia de termos de referência para o desempenho energético-ambiental - Porto Vivo*, Porto, Portugal, 2010.
- [21] International Energy Agency, “Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050,” Paris, 2006.
- [22] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2011,” Paris, 2011.
- [23] Parlamento Europeu e Conselho, *Proposta relativa à criação e ao funcionamento de uma reserva de estabilização do mercado para o regime de comércio de licenças de emissão de gases com efeito de estufa, da União Europeia, e que altera a Diretiva 2003/87/CE*, Bruxelas, 2014.
- [24] *EN ISO 15978:2011 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method*, 2011.
- [25] Adalberth, K., *Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: Examples*, vol. 32, Building and Environment, p. 321–329.
-

-
- [26] Sartori, I. and Hestnes, A., *Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article*, vol. 39, Energy and Buildings, 2007, p. 249–257.
- [27] Thormark, C., *A low energy building in a life cycle - Its embodied energy, energy need for operation and recycling potential*, vol. 37, Building and Environment, 2002, p. 429–435.
- [28] Ramos, A., *Os custos do desenvolvimento sustentável para a Engenharia, Arquitetura e Construção nos processos de reabilitação - Dissertação para a obtenção do grau de Doutora em Engenharia Civil*, Coimbra: Universidade de Coimbra, 2009.
- [29] Comissão Europeia, *Diretiva 2012/27/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à eficiência energética*, In Jornal Oficial da União Europeia, n.º L315, 14 de Novembro de 2012, 2012, pp. 1-56.
- [30] Comissão Europeia, *Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios*, Vols. %1 de %2L 1, n.º 11, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 2002, p. 65–71.
- [31] *Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis*, 2009.
- [32] Kibert, C., *Sustainable construction: green building design and delivery*, 2.^a ed., 2008.
- [33] Vicente, R., *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana - Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra - Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil*, Aveiro: Universidade de Aveiro, 2008.
- [34] United Nations Environment Programme, *Buildings and Climate Change*, 2007.
- [35] Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, *Decreto-Lei 53*, Lisboa: Diário da República, 2014.
- [36] European Commission, *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*, 2011.
- [37] Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, *Decreto-Lei 68-A - Eficiência energética e cogeração*, 2015.
- [38] DGEG, *Estratégia nacional para a renovação de edifícios*, 2014.

- [39] *Decreto-Lei 79/2006 - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)*, Lisboa, Portugal: Diário da República, I Série - A, n.º 67, 2006.
- [40] European Commission, “Notification,” 2015. [Online]. Available: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-5196_en.htm. [Acedido em 13 Julho 2015].
- [41] DGEG - Comissão Executiva do PNAEE, “Avisos do Fundo de Eficiência Energética,” 2015.
- [42] The Coalition for Energy Savings, *Implementing the EU Energy Efficiency Directive - Latest analysis of Member State plans for end-use energy savings targets (Article 7)*, 2015.
- [43] Ricardo-AEA, *Study evaluating the national policy measures and methodologies to implement Article 7 of the Energy Efficiency Directive - Final Report*, 2015.
- [44] Eurostat - Statistics Explained, “Energy from renewable sources - Main tables and database,” 2015.
- [45] *Decreto-Lei 153/2014 - Microprodução*, Lisboa, Portugal: Diário da República, 1.ª série - N.º 202, 2014.
- [46] DGEG, “Renováveis - Estatísticas Rápidas - abril 2015,” 2015.
- [47] Comissão Europeia, *Relatório da Comissão ao Parlamento Europeu e ao Conselho - Progressos dos Estados-Membros na via para edifícios com necessidades quase nulas de energia*, 2013.
- [48] BPIE, *Nearly zero energy buildings definitions across Europe*, 2015.
- [49] ADENE, *Perguntas & Respostas sobre o SCE versão 1.2*, 2009.
- [50] *Decreto-Lei 40/1990 – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, vol. 31, Lisboa: Diário da República, 1990.
- [51] *Decreto-Lei 78/2006 - Sistema de Certificação Energética (SCE) e da Qualidade do Ar interior dos Edifícios*, Lisboa, Portugal: Diário da República, I Série – A, n.º 67, 2006.
- [52] *Decreto-Lei 80/2006 - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)*, Portugal: Diário da República, I Série - A, n.º 67, 2006, p. 2468–2513.

-
- [53] Comissão Europeia, *Diretiva 2006/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à eficiência na utilização final de energia e aos serviços energéticos e que revoga a Diretiva 93/76/CE do Conselho*, Jornal Oficial da União Europeia, 2006, p. 6.
- [54] Ferreira, J., Pinheiro, M., “In search of better energy performance in the Portuguese buildings - The case of the Portuguese regulation,” *Energy Policy*, 2011.
- [55] Kurnitski, J., Allard, F., Braham, D., Goeders, G., Heiselberg, P., Jagemar, L., Kosonen, R., Lebrun, J., Mazzarella, L., Railio, J., Seppänen, O., Schmidt, M. and Virta, M., “How to define nearly net zero energy buildings nZEB,” *REHVA Journal*, pp. 6-12, Maio 2011.
- [56] Buildings Performance Institute Europe, *Implementing the cost-optimal methodology in EU countries – Lessons learned from three case studies*, 2013.
- [57] *EN 15459 - Energy performance of buildings - Economic evaluation procedure for energy systems in buildings*, European Committee for Standardization, 2007.
- [58] Comissão Europeia, *EU Energy, Transport and GHG Emissions: Trends to 2050, Reference Scenario 2013*, 2013.
- [59] Santos, C. e Matias, L., *ITE 50 - Coeficientes de Transmissão Térmica da Envolvente dos Edifícios*, Laboratório de Engenharia Civil, 2006.
- [60] DGEG, *Cost-optimal study for new residential buildings in Portugal*, Lisboa, 2013.
- [61] Loga, T. et al, *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment - Main Results of the TABULA project*, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2012.
- [62] Wouters, P., *ASIEPI - Stimulating Increased Energy Efficiency and better building ventilation*, 2010.
- [63] Corgnati, S., Fabrizio, E., Filippi, M. and Monetti, V., “Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application,” *Applied Energy*, 2012.
- [64] “ASIEPI - P158 - A set of reference buildings for energy performance calculation studies”.
- [65] Ferreira, M., Almeida, M., Rodrigues, A., Silva, S., “Comparing cost-optimal and net-zero energy targets in building retrofit,” *Building Research & Information*, 2014.
-

- [66] Serra, C., Simões, N., Tadeu, S. and Tadeu, A., “Definition of reference buildings for energy performance calculation - Portuguese case,” em *Conference EfS*, Coimbra, Portugal, 2013.
- [67] Vasconcelos, A., Pinheiro, M., Manso, A., Cabaço, A., “A Portuguese approach to define reference buildings for cost-optimal methodologies,” *Applied Energy*, vol. 140, pp. 316-328, 2015.
- [68] Bragança, L., Wetzel, C. and Buhagiar, V., *Improving the quality of existing urban building envelopes - Façades and roofs*, COST C16 - IOS Press, 2007.
- [69] *EN ISO 13790:2008 - Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*, 2008.
- [70] Fokaides, P. and Papadopoulos, A., “Cost-optimal insulation thickness in dry and mesothermal climates: Existing models and their improvement,” *Energy and Buildings*, vol. 68, p. 203–212, January 2014.
- [71] Papakostas, K., Papadopoulos, A. and Vlahakis, I., “Optimisation of thermal protection in residential buildings using the variable base degree-days method,” *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 24, p. 19–31, 2005.
- [72] ECOFYS, “Primary energy factors for electricity in buildings - Project number PSTRNL111077,” Utrecht, 2011.
- [73] International Organization for Standardization, *EN ISO 14040 - Environmental management Life Cycle Assessment principles and framework*, 2006.
- [74] Norris, G., Road, B. and Berwick, N., “Integrating Life Cycle Cost Analysis and LCA InLCA : SeLected Papers,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 6, p. 118–120, 2001.
- [75] Gu, L., Lin, B., Zhu, Y., Gu, D., Huang, M. and Gai, J., “Integrated assessment method for building life cycle environmental and economic performance,” *Build. Simul.*, vol. 1, p. 169–177, June 2008.
- [76] Ristimäki, M., Säynäjoki, A. Heinonen, J. and Junnila, S., “Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design,” *Energy*, vol. 63, p. 168–179, December 2013.
- [77] Lollini, Barozzi, Fasano, Meroni, and Zinzi, “Optimisation of opaque components of the building envelope. Energy, economic and environmental issues,” *Building and Environment*, vol. 41, p. 1001–1013, August 2006.

-
- [78] Anastaselos, D., Giama, E. and Papadopoulos, A., “An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions,” *Energy and Buildings*, vol. 41, p. 1165–1171, November 2009.
- [79] Kim, S., Lee, S., Na, Y. and Kim, J., “Conceptual model for LCC-based LCCO2 analysis of apartment buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 64, p. 285–291, September 2013.
- [80] Kneifel, J., “Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 42, p. 333–340, March 2010.
- [81] Silvestre, J., Brito, J. and Pinheiro, M., “From the new European Standards to an environmental, energy and economic assessment of building assemblies from cradle-to-cradle (3E-C2C),” *Energy and Buildings*, vol. 64, p. 199–208, May 2013.
- [82] Hernandez, P. and Kenny, P., “Integrating occupant preference and life cycle energy evaluation: a simplified method,” *Build. Res. Inf.*, vol. 38, p. 625–637, December 2010.
- [83] Nordby, A., “Carbon reductions and building regulations: the case of Norwegian mountain cabins,” *Build. Res. Inf.*, p. 37–41, December 2011.
- [84] Meester, T., Marique, A., De Herde, A. and Reiter, S., “Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of Europe,” *Energy and Buildings*, vol. 57, p. 313–323, February 2013.
- [85] Azar, E. and Menassa, C., “A comprehensive analysis of the impact of occupancy parameters in energy simulation of office buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 55, p. 841–853, December 2012.
- [86] Kaynakli, O., “A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, p. 415–425, January 2012.
- [87] Jelle, B., “Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities,” *Energy and Buildings*, vol. 43, p. 2549–2563, October 2011.
- [88] Panão, M., Rebelo, M. and Camelo, S., “How low should be the energy required by a nearly Zero-Energy Building? The load/generation energy balance of Mediterranean housing,” *Energy Buildings*, vol. 61, p. 161–171, 2013.

- [89] Axaopoulos, I., Axaopoulos, P. and Gelezenis, J., “Optimum insulation thickness for external walls on different orientations considering the speed and direction of the wind,” *Applied Energy*, vol. 117, p. 167–175, March 2014.
- [90] Verbeeck, G. and Hens, H., “Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable?,” *Energy and Buildings*, Vols. %1 de %237, n.º 7, p. 747–754, July 2005.
- [91] Adhikari, R. S., Aste, N., Del Pero, C. and Manfren, M., “Net Zero Energy Buildings: Expense or Investment?,” *Energy Procedia*, vol. 14, p. 1, Janeiro 2012.
- [92] Popescu, D., Bienert, S., Schützenhofer, C. and Boazu, R., *Impact of energy efficiency measures on the economic value of buildings*, vol. 89, *Applied Energy*, 2012, p. 454–463.
- [93] Nikolaidis, Y., Pilavachi, P. and Chletsis, A., “Economic evaluation of energy saving measures in a common type of Greek building,” *Applied Energy*, Vols. %1 de %286, n.º 12, p. 2550–2559, December 2009.
- [94] Kumbaroğlu, G. and Madlener, R., *Evaluation of economically optimal retrofit investment options for energy savings in buildings*, vol. 49, *Energy and Buildings*, 2012, p. 327–334.
- [95] Bloomberg L. P., “Portuguese Government Bond - 30YR Bond Portugal PL Analysis - GSPT30YR,” 2015. [Online].
- [96] Damodaran, A., *Investment Valuation: Tools and techniques for determining the value of any asset*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [97] Soares, M., *Algumas considerações de irreversibilidade e de diferimento de investimentos produtivos*, vol. 7, *Notas Económicas*, 1996, pp. 90-98.
- [98] Silva, P., *Técnicas de análise de investimentos – do VAL às opções reais*, Faculdade de Economia, Universidade de Coimbra, 1999.
- [99] Myers, C., “The capital structure puzzle,” *Journal of Finance*, pp. 575-591, 1984.
- [100] Pindyck, R., “Irreversible investment, capacity choice and the value of the firm,” *American Economic Review*, vol. 78, pp. 969-985, 1988.
- [101] Rysanek, A. and Choudhary, R., “Optimum building energy retrofits under technical and economic uncertainty,” *Energy and Buildings*, vol. 57, p. 324–337, 2013.

- [102] Asadi, E., Silva, M. G. da, Antunes, C. H. e Dias, L., *Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application*, vol. 44, Energy and Buildings, 2012, p. 81–87.
- [103] Soares, N., Dias, L., Ferreira, J., Silva, P. and Conceição, P., “Energy efficiency of higher education buildings: a case study,” *International Journal of Sustainability in Higher Education*, nº 5, 2014.
- [104] Diakaki, C., Grigoroudis, E. and Kolokotsa, D., “Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 40, p. 1747–1754, 2008.
- [105] Caccavelli, D. and Gugerli, H., “TOBUS, a European diagnosis and decision-making tool for office building upgrading,” *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 113-119, 2002.
- [106] Doukas, H., Nychtis, C. and Psarras, J., “Assessing energy-saving measures in buildings through an intelligent decision support model,” *Building and Environment*, vol. 44, pp. 290-298, 2009.
- [107] Chidiac, S., Catania, E., Morofsky, E. and Foo, S., “A screening methodology for implementing cost effective energy retrofit measures in Canadian office buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 43, p. 614–620, 2011.
- [108] Chidiac, S., Catania, E., Morofsky, E. and Foo, S., “Effectiveness of single and multiple energy retrofit measures on the energy consumption of office buildings,” *Energy*, vol. 36, p. 5037–5052, 2011.
- [109] Verbruggen, A., Al Marchohi, M. and Janssens, B., “The anatomy of investing in energy efficient buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 43, p. 905–914, 2011.
- [110] Tadeu, S., Tadeu, A., Simões, N. and Gonçalves, M., *The impact of thermal insulation cost on the profitability of energy rehabilitation of buildings*, Madeira: 40th IAHS World Congress on Housing - Sustainable Housing Construction, 2014.
- [111] Trigeorgis, L., *Real options – managerial flexibility and strategy in resource allocation*, Massachusetts: The MIT Press, 1996.
- [112] Rodrigues, C., Luiz, I., Tadeu, S. F., Freire, F., “Environmental assessment of alternative options for the roof retrofit of an historic building,” em *Cincos'12*, Aveiro, Portugal, 2009.
- [113] Rodrigues, C., Luiz, I., Tadeu, S. e Freire, F., “Reabilitação da cobertura de um edifício histórico - Uma avaliação ambiental,” *Revista Internacional Construlink*, 2012.

-
- [114] CYPE Ingenieros S. A., “Gerador de preços para construção civil,” 2015. [Online]. [Acedido em 2015].
- [115] ACEPE, *Associação Industrial do Poliestireno Expandido*, 2015.
- [116] APFAC, *Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS*, 2015.
- [117] Al-Homoud, D., *Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials*, vol. 40, Building and Environment, 2005, p. 353–366.
- [118] “Ciclo de Carnot,” Infopédia.
- [119] SunProject, “Princípio de funcionamento da Bomba de calor”.
- [120] Portal Energia - Energias Renováveis, 2009.
- [121] “SolTerm 5 - Versão 5.1.4,” Laboratório Nacional de Energia e Geologia - LNEG.
- [122] “PVsyst – PV Design and Simulation Software,” 2015.
- [123] Energia Biomassa, *Como funciona um Equipamento a Pellets - Energia Biomassa - Energias Renováveis em Portugal*, 2009.
- [124] Eros, S. and Hassid, V., *Environmental design of urban buildings- An integrated approach*, Earthscan, 2006.
- [125] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos - ERSE, “Portal ERSE,” 2009. [Online]. Available: <http://www.erse.pt/pt/Paginas/home.aspx>. [Acedido em 2015].
- [126] “Composição dos preços de eletricidade, incluindo os custos de interesse económico geral,” 2012. [Online]. [Acedido em 2015].
- [127] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Preços de referência no mercado liberalizado de energia elétrica e gás natural em Portugal continental*, 2014.
- [128] Ministério da Indústria e Energia, *Decreto-Lei 4/1993*, Lisboa: Diário da República, 1993.
- [129] Caixa Geral de Depósitos, “Crédito para Reabilitação Urbana,” 2015. [Online]. Available: <https://www.cgd.pt/Particulares/Casa/Credito-Habitacao/Pages/Credito-Habitacao-Reabilitacao-Urbana-Obras.aspx>. [Acedido em Março 2015].
-

-
- [130] Eurostat, “Electricity and natural gas price statistics - Statistics explained,” 2013. [Online]. Available: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Electricity_and_natural_gas_price_statistics. [Acedido em 2013].
- [131] Tadeu, S., Rodrigues, C., Tadeu, A., Freire, F. and Simões, N., *Energy retrofit of a historic building in a UNESCO World Heritage site - An integrated cost optimality and environmental assessment*, Madrid: International Conference in Energy Efficiency in Historic Buildings, 2014.
- [132] Tadeu, S., Simões, N., Ribeiro, J., Gonçalves, M. and Tadeu, A., “Energy efficiency measures in Portuguese residential buildings constructed before 1960 - A cost-optimal assessment,” em *Conference EfS*, Coimbra, Portugal, 2013.
- [133] Malatji, E. M., Zhang, J., and Xia, X., *A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision*, vol. 61, Energy and Buildings, 2013, p. 81–87.
- [134] Tadeu, S., Silva, P., Alexandre, R., Tadeu, A. and Simões, N., *Cost optimality and real options in investments for energy retrofitting in buildings, in Portugal*, 2015.
- [135] Coello, C., Lamont, G. e Veldhuizen, D., *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problem*, Segunda edição ed., Springer, 2007.
- [136] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. e Meyarivan, T., *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*, vol. 6(2), Evolutionary Computation, IEEE, 2002, pp. 182-187.
- [137] Ecofys, *U-Values - For better energy performance of buildings*, European Insulation Manufactures Association, 2007.
- [138] Ruas. [Online]. Available: http://www.uc.pt/ruas/property/apres_pt_bem.pdf.
- [139] Câmara Municipal de Coimbra, *Plano municipal de ordenamento*, Coimbra, 2015.
- [140] Trindade, L., *A casa corrente em Coimbra. Dos finais da Idade Média aos inícios da Época Moderna*, Coimbra: Câmara Municipal de Coimbra, 2002.
- [141] U. S. D. of Energy, “EnergyPlus Energy Simulation Software - Weather Data,” 2015.
- [142] IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
-

- [143] Kellenberger, D., Althaus, H., Künniger, T., Lehmann, M. and Jungbluth, N., *Life Cycle Inventories of Building Products*, vol. 07, Ecoinvent Rep., 2007.
- [144] Spielmann, M., Bauer, C., Dones, R. and Tuchschnin, M., *Life Cycle Inventories of Transport Services*, vol. 2.0, Ecoinvent Rep., 2007.
- [145] Althaus, H. J., Bauer, C., Doka, G., Frischknecht, R., Jungbluth, N., Nemecek, T., Simons, A., Stucki, M., Sutter, J. and Tuchschnin, M., *Documentation of changes implemented in ecoinvent Data v2.1 and v2.2*, Ecoinvent Rep., 2010.
- [146] Hischer, R., Editors, B. W., Althaus, H., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Frischknecht, R., Hellweg, S., Humbert, S., Jungbluth, N., Köllner, T., Loerincik, Y., Margni, M. and Nemecek, T., *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*, vol. 2.2, Ecoinvent Rep., 2010.
- [147] PRé Consultants, “SimaPro 8,” 2014.
- [148] Rodrigues, C. and Freire, F., *Integrated life-cycle assessment and thermal dynamic simulation of alternative scenarios for the roof retrofit of a house*, vol. 81, Buildings and Environment, 2014, pp. 204-2015.
- [149] Belton, V. and Stewart, T., *Multiple criteria decision analysis : an integrated approach*, 2nd printing ed., Boston: Kluwer Academic Publishers [BP 519.8 BEL] , 2003.
- [150] Goodwin, P. and Wright, G., *Decision analysis for management judgment*, vol. Chapter 3, Chichester, John Wiley & Sons, 2004, pp. 27-70.
- [151] VPSolutions, *Visual PROMETHEE 1.4 Manual*, 2013.
- [152] *EN ISO 13789:2007 - Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method*, 2007.
- [153] Keeney, R., *Value-focused thinking: A path to a creative decision-making*, Cambridge: Harvard University Press, 1992.
- [154] Stefanopoulos, K., Yang, H., Gemitzi, A. and Tsagarakis, K., *Application of the Multi-Attribute Value Theory for engaging stakeholders in groundwater protection in the Vosvozis catchment in Greece*, Science of the Total Environment, 2014, p. 26–33.
- [155] Teixeira, J., and Belderrain, M., *Aplicabilidade da teoria de utilidade multicritério (MAUT) na seleção de sistemas de ensino brasileiro*, Santa Catarina: COBENGE2011, XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2011.

-
- [156] Ananda, J. and Herath, G., *Incorporating stakeholder values into regional forest planning: a value function approach*, vol. 45, Ecological Economics, 2003, pp. 75-90.
- [157] Velasquez, M. and Hester, P. T., *An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods*, vol. 10, International Journal of Operations Research, 2013, pp. 56-66.
- [158] VaasaETT, *Household energy price index for Europe*, 2015.

Anexo I – Quadro dos edifícios existentes em estudo - dimensões e características gerais

Edifícios de referência (renovação profunda)

Edifícios existentes	Geometria do edifício (1)	Percentagem de área de janelas na envolvente do edifício e de janelas sem exposição ao sol	Área de pavimento [m ²] em conformidade com a regulamentação nacional	Descrição do edifício (2)	Descrição da tecnologia de construção corrente (3)
1) Edifícios unifamiliares e suas subcategorias					
Anterior a 1960 Virtual	Superfície da envolvente [m ²] / Volume útil [m ³] (S/V): 96,55/216,00; Orientação: N, S, W, E; Áreas das fachadas: N: 21,14 [m ²]; W: 21,14 [m ²]; S: 21,14 [m ²]; E: 21,14 [m ²]	% área de janelas na envolvente: 12,43%; % área de janela sem exposição ao sol em relação à área da envolvente: 3,11%	Área útil: 80 [m ²]	Materiais de construção: Paredes: alvenaria ordinária de pedra, rebocada em ambas as faces, com espessura de 50 [cm]; Cobertura: inclinada revestida com telha cerâmica, laje aligeirada de blocos cerâmicos com espessura de 15 [cm] e revestimento do teto com 2 [cm] em estuque; Pavimentos: revestimento em ladrilho, 4 [cm] de betonilha, laje aligeirada de 15 [cm] e revestimento de teto com 2 [cm] em reboco; Envidraçados: caixilharia de madeira e vidro corrente simples; RPH mínimo de Inverno/Verão: 0,4/0,6 [h ⁻¹]; Idade: > 55 anos	Sistema de AQS: esquentador a gás natural com eficiência igual a 0,60; Sistema de aquecimento: emissor elétrico com eficiência igual a 1,00; Sistema de arrefecimento: unidades multisplit classe de eficiência C; U coberturas: 2,80 [W/(m ² .°C)]; U paredes: 2,00 [W/(m ² .°C)]; U pavimentos: 1,65 [W/(m ² .°C)]; Envidraçados: Área: 12,00 [m ²]; U: 5,10 [W/(m ² .°C)]; Fator solar global: 0,85 - com proteções móveis e fixas ativadas: 0,38; Sombreamento: cortinas transparentes claras
1961 - 1990 Virtual	S/V: 108,00/270,00 Orientação: N, S, W, E; Áreas da fachadas N: 23,25 [m ²]; W: 23,25 [m ²]; S: 23,25 [m ²]; E: 23,25 [m ²]	% área de janelas na envolvente: 13,89%; % área de janela sem exposição ao sol em relação à área da envolvente: 3,47%	Área útil: 100 [m ²]	Materiais de construção: Paredes: parede simples de alvenaria de tijolo furado de 22 [cm], rebocada em ambas as faces, com espessura de 26 [cm]; Cobertura: inclinada revestida com telha cerâmica, laje aligeirada de blocos cerâmicos com espessura de 15 [cm] e revestimento do teto de 2 [cm] em estuque; Pavimentos: revestimento em ladrilho, 4 [cm] de betonilha, laje aligeirada de 15 [cm] e revestimento de teto com 2 [cm] em reboco; Envidraçados: caixilharia metálica de correr sem corte térmico e vidro simples corrente; RPH mínimo de Inverno/Verão: 0,4/0,6 [h ⁻¹]; Idade: 25-54 anos	Sistema de AQS: esquentador a gás natural com eficiência igual a 0,60; Sistema de aquecimento: emissor elétrico com eficiência igual a 1,00; Sistema de arrefecimento: unidades multisplit classe de eficiência C; U coberturas: 2,80 [W/(m ² .°C)]; U paredes: 1,30 [W/(m ² .°C)]; U pavimentos: 1,65 [W/(m ² .°C)]; Envidraçados: Área: 15,00 [m ²]; U: 4,10 [W/(m ² .°C)]; Fator solar global: 0,85 - com proteções móveis e fixas ativadas: 0,30; Sombreamento: portadas opacas interiores claras
2) Edifício multifamiliar - dados de um apartamento					
Anterior a 1919 Real	S/V: 186,00/339,15; Orientação: N, S, W, E; Áreas médias das fachadas W: 40,29 [m ²]; S: 20,14 [m ²]; E: 10,07 [m ²] (98,35 [m ²] de paredes em contato com edifícios adjacentes)	% área de janelas na envolvente: 9,22%; % área de janela sem exposição ao sol em relação à área da envolvente: 1,61%	Área útil: 119 [m ²]	Materiais de construção: Paredes: alvenaria ordinária de pedra, rebocada em ambas as faces, com espessura de 50 [cm]; Cobertura: inclinada revestida com telha cerâmica, laje aligeirada de blocos cerâmicos com espessura de 15 [cm] e revestimento do teto com 2 [cm] em estuque; Pavimentos: revestimento em ladrilho, 4 [cm] de betonilha, laje aligeirada de 15 [cm] e revestimento de teto com 2 [cm] em reboco; Envidraçados: caixilharia de madeira e vidro corrente simples; RPH mínimo de Inverno/Verão: 0,4/0,6 [h ⁻¹]; Idade: > 115 anos	Sistema de AQS: esquentador a gás natural com eficiência igual a 0,60; Sistema de aquecimento: emissor elétrico com eficiência igual a 1,00; Sistema de arrefecimento: unidades multisplit classe de eficiência C; U coberturas: 2,10 [W/(m ² .°C)]; U paredes: 1,84 [W/(m ² .°C)]; U pavimentos: 1,40 [W/(m ² .°C)]; Envidraçados: Área: 17,15 [m ²]; U: 5,10 [W/(m ² .°C)]; Fator solar global: 0,85 - com proteções móveis e fixas ativadas: 0,38; Sombreamento: cortinas transparentes claras

(1) S/V, orientação, área das fachadas N/W/S/E.

(3) Sistemas técnicos dos edifícios, coeficientes de transmissão térmica (U) dos componentes dos edifícios, janelas - área, coeficiente U, fator solar g, sombreamento.

(2) Materiais de construção, renovação do ar, idade.

Anexo II – Quadro dos edifícios existentes – desempenho

Edifício unifamiliar anterior a 1960 - parte A

Cálculo	Método e instrumentos	As estimativas das necessidades reais anuais de energia útil são determinadas de acordo com o método proposto no capítulo 3, baseado na EN ISO 13790:2008, considerando: a) Cada edifício e/ou fração autónoma do edifício como uma única zona, com as mesmas condições interiores de referência; b) A aplicação de fatores de redução de consumo às necessidades nominais de aquecimento estimadas pelo método sazonal; c) A determinação das necessidades energéticas para a preparação de AQS de acordo com o Despacho 15793-I/2013.		
	Fatores de conversão de energia primária	Eletricidade: 2,5 [kWh _{EP} /kWh]; Combustíveis sólidos, líquidos e gasosos não renováveis: 1,0 [kWh _{EP} /kWh]; Energia térmica de origem renovável: 1,0 [kWh _{EP} /kWh];		
Condições climáticas	Localização (latitude; longitude)	Albufeira (37,1121575; -8,2179188)		
	Graus-dias de aquecimento	987	GD (HDD)	
	Graus-dias de arrefecimento	Não considerados	CDD	
	Fonte de dados climáticos	Decreto-Lei 118/2013; Despacho 15793-F/2013		
	Descrição do terreno	Zona urbana; Foram considerados 20° de obstrução de horizonte		
Geometria do edifício	Comprimento x largura x altura	8,94 x 8,94 x 2,70	m x m x m	
	Número de pisos	1	---	
	Razão S/V (superfície/volume)	96,55/216,00	m ² /m ³	
	Porcentagem de área com janelas em relação à área total da envolvente do edifício	Sul	3,11	%
		Leste	3,11	%
		Norte	3,11	%
Oeste		3,11	%	
Orientação	0	°		
Ganhos internos	Utilização do edifício	Habitação unifamiliar		
	Ganho térmico médio devido aos ocupantes	4 (total)	W/m ²	
	Potência elétrica do sistema de iluminação			
	Potência elétrica dos equipamentos elétricos			
Componentes do edifício	Coeficiente U médio da cobertura	2,800	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das paredes	2,000	W/m ² K	
	Coeficiente U médio do pavimento	1,650	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das janelas	5,100	W/m ² K	
	Pontes térmicas	Comprimento total	122,32	m
		Transmissão térmica linear média	0,54	W/mK
	Inércia térmica	Média	150 ≤ It ≤ 400	kg/m ²
	Tipos de sistemas de sombreamento	Cortinas transparentes claras		
	Fator solar (g)	Vidros	0,85	---
		Vidros + sistemas de sombreamento	0,38	---
Taxa de infiltração (renovações de ar por hora)	Mínimo de Inverno:	0,4	1/h	
	Mínimo de Verão:	0,6	1/h	

Edifício unifamiliar anterior a 1960 - parte B

Sistemas do edifício	Ventilação	Renovações de ar por hora	Não existe	1/h	
		Eficiência da recuperação térmica	Não existe	%	
	Aquecimento	Eficiência	100	%	
	Arrefecimento	Eficiência	Não existe		
	AQS	Eficiência	60	%	
	Sistema urbano de aquecimento e arrefecimento	Eficiência na geração	Não existe	%	
Eficiência na distribuição		Não existe	%		
Parâmetros de regulação e escalonamento utilizados no edifício	Temperatura de regulação	Inverno	18	°C	
		Verão	25	°C	
	Humidade de regulação	Inverno	50	%	
		Verão	50	%	
	Escalonamento das operações e dos controlos	Ocupantes	O valor de 4 [W/m ²] para os ganhos térmicos internos inclui os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes e o calor dissipado nos equipamentos e nos dispositivos de iluminação		
		Iluminação			
		Aparelhos			
		Ventilação	Natural		
		Sistema de aquecimento	Entram em funcionamento sempre que a temperatura do espaço ultrapassa as temperaturas de regulação		
		Sistema de arrefecimento	Não existe		
Necessidades / utilização de energia do edifício	Contribuição em termos de energia térmica das principais estratégias passivas implementadas		Não considerada	kWh/a	
	Necessidades de energia para aquecimento (1)		1650	kWh/a	
	Necessidades de energia para arrefecimento		Negligenciadas	kWh/a	
	Necessidades de energia para preparação de AQS		1783	kWh/a	
	Necessidades de energia para o sistema urbano de aquecimento e arrefecimento		Não existem	kWh/a	
	Outras necessidades de energia (humidificação, desumidificação)		Não consideradas	kWh/a	
	Necessidades de energia para ventilação		Não existem	kWh/a	
	Necessidades de energia para iluminação no interior		Não aplicável	kWh/a	
	Outras necessidades de energia (aparelhos, iluminação exterior, sistemas auxiliares, etc.)		Não aplicável	kWh/a	
Geração de energia no edifício	Energia térmica de fontes renováveis (p. ex., coletores solares térmicos)		0	kWh/a	
	Energia elétrica gerada no edifício e utilizada <i>in situ</i>		0	kWh/a	
	Energia elétrica gerada no edifício e exportada para o mercado		0	kWh/a	
Consumo de energia	Energia final fornecida	Eletricidade	1650	kWh/a	
		Combustíveis fósseis	2972	kWh/a	
		Outras formas (biomassa, aquecimento/arrefecimento urbano, etc.)	0	kWh/a	
	Energia primária		7095	kWh/a	

(1) Consumo real estimado com base na aplicação de fator de redução de 0,134 (ou 13,4%) às necessidades de energia útil, inicialmente indicadas pelo método sazonal.

Edifício unifamiliar anterior a 1960 - parte A

Cálculo	Método e instrumentos	As estimativas das necessidades reais anuais de energia útil são determinadas de acordo com o método proposto no capítulo 3, baseado na EN ISO 13790:2008, considerando: a) Cada edifício e/ou fração autónoma do edifício como uma única zona, com as mesmas condições interiores de referência; b) A aplicação de fatores de redução de consumo às necessidades nominais de aquecimento estimadas pelo método sazonal; c) A determinação das necessidades energéticas para a preparação de AQS de acordo com o Despacho 15793-I/2013.		
	Fatores de conversão de energia primária	Eletricidade: 2,5 [kWh _{EP} /kWh]; Combustíveis sólidos, líquidos e gasosos não renováveis: 1,0 [kWh _{EP} /kWh]; Energia térmica de origem renovável: 1,0 [kWh _{EP} /kWh];		
Condições climáticas	Localização (latitude; longitude)	Amarante (41,2693112; -8,0800385)		
	Graus-dias de aquecimento	1570	GD (HDD)	
	Graus-dias de arrefecimento	Não considerados	CDD	
	Fonte de dados climáticos	Decreto-Lei 118/2013; Despacho 15793-F/2013		
	Descrição do terreno	Zona urbana; Foram considerados 20° de obstrução de horizonte		
Geometria do edifício	Comprimento x largura x altura	8,94 x 8,94 x 2,70	m x m x m	
	Número de pisos	1	---	
	Razão S/V (superfície/volume)	96,55/216,00	m ² /m ³	
	Porcentagem de área com janelas em relação à área total da envolvente do edifício	Sul	3,11	%
		Leste	3,11	%
		Norte	3,11	%
		Oeste	3,11	%
Orientação	0	°		
Ganhos internos	Utilização do edifício	Habitação unifamiliar		
	Ganho térmico médio devido aos ocupantes	4 (total)	W/m ²	
	Potência elétrica do sistema de iluminação			
	Potência elétrica dos equipamentos elétricos			
Componentes do edifício	Coeficiente U médio da cobertura	2,800	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das paredes	2,000	W/m ² K	
	Coeficiente U médio do pavimento	1,650	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das janelas	5,100	W/m ² K	
	Pontes térmicas	Comprimento total	122,32	m
		Transmissão térmica linear média	0,54	W/mK
	Inércia térmica	Média	150 ≤ It ≤ 400	kg/m ²
	Tipos de sistemas de sombreamento	Cortinas transparentes claras		
	Fator solar (g)	Vidros	0,85	---
		Vidros + sistemas de sombreamento	0,38	---
Taxa de infiltração (renovações de ar por hora)	Mínimo de Inverno:	0,4	1/h	
	Mínimo de Verão:	0,6	1/h	

Edifício unifamiliar anterior a 1960 - parte B

Sistemas do edifício	Ventilação	Renovações de ar por hora	Não existe	1/h	
		Eficiência da recuperação térmica	Não existe	%	
	Aquecimento	Eficiência	100	%	
	Arrefecimento	Eficiência	Não existe		
	AQS	Eficiência	60	%	
	Sistema urbano de aquecimento e arrefecimento	Eficiência na geração	Não existe	%	
Eficiência na distribuição		Não existe	%		
Parâmetros de regulação e escalonamento utilizados no edifício	Temperatura de regulação	Inverno	18	°C	
		Verão	25	°C	
	Humidade de regulação	Inverno	50	%	
		Verão	50	%	
	Escalonamento das operações e dos controlos	Ocupantes	O valor de 4 [W/m ²] para os ganhos térmicos internos inclui os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes e o calor dissipado nos equipamentos e nos dispositivos de iluminação		
		Iluminação			
		Aparelhos			
		Ventilação	Natural		
		Sistema de aquecimento	Entram em funcionamento sempre que a temperatura do espaço ultrapassa as temperaturas de regulação		
		Sistema de arrefecimento	Não existe		
Necessidades / utilização de energia do edifício	Contribuição em termos de energia térmica das principais estratégias passivas implementadas		Não considerada	kWh/a	
	Necessidades de energia para aquecimento (1)		2755	kWh/a	
	Necessidades de energia para arrefecimento		Negligenciadas	kWh/a	
	Necessidades de energia para preparação de AQS		1783	kWh/a	
	Necessidades de energia para o sistema urbano de aquecimento e arrefecimento		Não existem	kWh/a	
	Outras necessidades de energia (humidificação, desumidificação)		Não consideradas	kWh/a	
	Necessidades de energia para ventilação		Não existem	kWh/a	
	Necessidades de energia para iluminação no interior		Não aplicável	kWh/a	
	Outras necessidades de energia (aparelhos, iluminação exterior, sistemas auxiliares, etc.)		Não aplicável	kWh/a	
Geração de energia no edifício	Energia térmica de fontes renováveis (p. ex., coletores solares térmicos)		0	kWh/a	
	Energia elétrica gerada no edifício e utilizada <i>in situ</i>		0	kWh/a	
	Energia elétrica gerada no edifício e exportada para o mercado		0	kWh/a	
Consumo de energia	Energia final fornecida	Eletricidade	2755	kWh/a	
		Combustíveis fósseis	2972	kWh/a	
		Outras formas (biomassa, aquecimento/arrefecimento urbano, etc.)	0	kWh/a	
	Energia primária		9860	kWh/a	

(1) Consumo real estimado com base na aplicação de fator de redução de 0,134 (ou 13,4%) às necessidades de energia útil, inicialmente indicadas pelo método sazonal.

Edifício unifamiliar anterior a 1960 - parte A

Cálculo	Método e instrumentos	As estimativas das necessidades reais anuais de energia útil são determinadas de acordo com o método proposto no capítulo 3, baseado na EN ISO 13790:2008, considerando: a) Cada edifício e/ou fração autónoma do edifício como uma única zona, com as mesmas condições interiores de referência; b) A aplicação de fatores de redução de consumo às necessidades nominais de aquecimento estimadas pelo método sazonal; c) A determinação das necessidades energéticas para a preparação de AQS de acordo com o Despacho 15793-I/2013.		
	Fatores de conversão de energia primária	Eletricidade: 2,5 [kWh _{EP} /kWh]; Combustíveis sólidos, líquidos e gasosos não renováveis: 1,0 [kWh _{EP} /kWh]; Energia térmica de origem renovável: 1,0 [kWh _{EP} /kWh];		
Condições climáticas	Localização (latitude; longitude)	Almeida (40,1829919; -7,4449645)		
	Graus-dias de aquecimento	1924	GD (HDD)	
	Graus-dias de arrefecimento	Não considerados	CDD	
	Fonte de dados climáticos	Decreto-Lei 118/2013; Despacho 15793-F/2013		
	Descrição do terreno	Zona urbana; Foram considerados 20° de obstrução de horizonte		
Geometria do edifício	Comprimento x largura x altura	8,94 x 8,94 x 2,70	m x m x m	
	Número de pisos	1	---	
	Razão S/V (superfície/volume)	96,55/216,00	m ² /m ³	
	Percentagem de área com janelas em relação à área total da envolvente do edifício	Sul	3,11	%
		Leste	3,11	%
		Norte	3,11	%
		Oeste	3,11	%
Orientação	0	°		
Ganhos internos	Utilização do edifício	Habitação unifamiliar		
	Ganho térmico médio devido aos ocupantes	4 (total)	W/m ²	
	Potência elétrica do sistema de iluminação			
	Potência elétrica dos equipamentos elétricos			
Componentes do edifício	Coeficiente U médio da cobertura	2,800	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das paredes	2,000	W/m ² K	
	Coeficiente U médio do pavimento	1,650	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das janelas	5,100	W/m ² K	
	Pontes térmicas	Comprimento total	122,32	m
		Transmissão térmica linear média	0,54	W/mK
	Inércia térmica	Média	150 ≤ It ≤ 400	kg/m ²
	Tipos de sistemas de sombreamento	Cortinas transparentes claras		
	Fator solar (g)	Vidros	0,85	---
		Vidros + sistemas de sombreamento	0,38	---
Taxa de infiltração (renovações de ar por hora)	Mínimo de Inverno:	0,4	1/h	
	Mínimo de Verão:	0,6	1/h	

Edifício unifamiliar anterior a 1960 - parte B

Sistemas do edifício	Ventilação	Renovações de ar por hora	Não existe	1/h	
		Eficiência da recuperação térmica	Não existe	%	
	Aquecimento	Eficiência	100	%	
	Arrefecimento	Eficiência	Não existe		
	AQS	Eficiência	60	%	
	Sistema urbano de aquecimento e arrefecimento	Eficiência na geração	Não existe	%	
Eficiência na distribuição		Não existe	%		
Parâmetros de regulação e escalonamento utilizados no edifício	Temperatura de regulação	Inverno	18	°C	
		Verão	25	°C	
	Humidade de regulação	Inverno	50	%	
		Verão	50	%	
	Escalonamento das operações e dos controlos	Ocupantes	O valor de 4 [W/m ²] para os ganhos térmicos internos inclui os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes e o calor dissipado nos equipamentos e nos dispositivos de iluminação		
		Iluminação			
		Aparelhos			
		Ventilação	Natural		
		Sistema de aquecimento	Entram em funcionamento sempre que a temperatura do espaço ultrapassa as temperaturas de regulação		
		Sistema de arrefecimento	Não existe		
Necessidades / utilização de energia do edifício	Contribuição em termos de energia térmica das principais estratégias passivas implementadas		Não considerada	kWh/a	
	Necessidades de energia para aquecimento (1)		3434	kWh/a	
	Necessidades de energia para arrefecimento		Negligenciadas	kWh/a	
	Necessidades de energia para preparação de AQS		1783	kWh/a	
	Necessidades de energia para o sistema urbano de aquecimento e arrefecimento		Não existem	kWh/a	
	Outras necessidades de energia (humidificação, desumidificação)		Não consideradas	kWh/a	
	Necessidades de energia para ventilação		Não existem	kWh/a	
	Necessidades de energia para iluminação no interior		Não aplicável	kWh/a	
	Outras necessidades de energia (aparelhos, iluminação exterior, sistemas auxiliares, etc.)		Não aplicável	kWh/a	
Geração de energia no edifício	Energia térmica de fontes renováveis (p. ex., coletores solares térmicos)		0	kWh/a	
	Energia elétrica gerada no edifício e utilizada <i>in situ</i>		0	kWh/a	
	Energia elétrica gerada no edifício e exportada para o mercado		0	kWh/a	
Consumo de energia	Energia final fornecida	Eletricidade	3434	kWh/a	
		Combustíveis fósseis	2972	kWh/a	
		Outras formas (biomassa, aquecimento/arrefecimento urbano, etc.)	0	kWh/a	
	Energia primária		11556	kWh/a	

(1) Consumo real estimado com base na aplicação de fator de redução de 0,134 (ou 13,4%) às necessidades de energia útil, inicialmente indicadas pelo método sazonal.

Edifício unifamiliar anterior a 1919 (Casa das Talhas) - parte A

Cálculo	Método e instrumentos	As estimativas das necessidades reais anuais de energia útil são determinadas de acordo com o método proposto no capítulo 3, baseado na EN ISO 13790:2008, considerando: a) Cada edifício e/ou fração autónoma do edifício como uma única zona, com as mesmas condições interiores de referência; b) A aplicação de fatores de redução de consumo às necessidades nominais de aquecimento estimadas pelo método sazonal; c) A determinação das necessidades energéticas para a preparação de AQS de acordo com o Despacho 15793-I/2013.		
	Fatores de conversão de energia primária	Eletricidade: 2,5 [kWh _{EP} /kWh]; Combustíveis sólidos, líquidos e gasosos não renováveis: 1,0 [kWh _{EP} /kWh]; Energia térmica de origem renovável: 1,0 [kWh _{EP} /kWh];		
Condições climáticas	Localização (latitude; longitude)	Albufeira (37,1121575; -8,2179188)		
	Graus-dias de aquecimento	987	GD (HDD)	
	Graus-dias de arrefecimento	Não considerados	CDD	
	Fonte de dados climáticos	Decreto-Lei 118/2013; Despacho 15793-F/2013		
	Descrição do terreno	Zona urbana; Foram considerados 20° de obstrução de horizonte		
Geometria do edifício	Comprimento x largura x altura (média)	10,91 x 10,91 x 2,85	m x m x m	
	Número de pisos	2	---	
	Razão S/V (superfície/volume)	186,00/339,15	m ² /m ³	
	Percentagem de área com janelas em relação à área total da envolvente do edifício	Sul	2,34	%
		Leste	1,61	%
		Norte	0,00	%
		Oeste	5,27	%
Orientação	0	°		
Ganhos internos	Utilização do edifício	Habitação unifamiliar		
	Ganho térmico médio devido aos ocupantes	4 (total)	W/m ²	
	Potência elétrica do sistema de iluminação			
	Potência elétrica dos equipamentos elétricos			
Componentes do edifício	Coeficiente U médio da cobertura	2,100	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das paredes	1,840	W/m ² K	
	Coeficiente U médio do pavimento	1,400	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das janelas	5,100	W/m ² K	
	Pontes térmicas	Comprimento total	132,40	m
		Transmissão térmica linear média	0,53	W/mK
	Inércia térmica	Média	150 ≤ It ≤ 400	kg/m ²
	Tipos de sistemas de sombreamento		Portadas opacas interiores claras	
	Fator solar (g)	Vidros	0,85	---
		Vidros + sistemas de sombreamento	0,38	---
Taxa de infiltração (renovações de ar por hora)	Mínimo de Inverno:	0,4	1/h	
	Mínimo de Verão:	0,6	1/h	

Edifício unifamiliar anterior a 1919 (Casa das Talhas) - parte B

Sistemas do edifício	Ventilação	Renovações de ar por hora	Não existe	1/h	
		Eficiência da recuperação térmica	Não existe	%	
	Aquecimento	Eficiência	100	%	
	Arrefecimento	Eficiência	Não existe		
	AQS	Eficiência	60	%	
	Sistema urbano de aquecimento e arrefecimento	Eficiência na geração	Não existe	%	
Eficiência na distribuição		Não existe	%		
Parâmetros de regulação e escalonamento utilizados no edifício	Temperatura de regulação	Inverno	18	°C	
		Verão	25	°C	
	Humidade de regulação	Inverno	50	%	
		Verão	50	%	
	Escalonamento das operações e dos controlos	Ocupantes	O valor de 4 [W/m ²] para os ganhos térmicos internos inclui os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes e o calor dissipado nos equipamentos e nos dispositivos de iluminação		
		Iluminação			
		Aparelhos			
		Ventilação	Natural		
		Sistema de aquecimento	Entram em funcionamento sempre que a temperatura do espaço ultrapassa as temperaturas de regulação		
		Sistema de arrefecimento	Não existe		
Necessidades / utilização de energia do edifício	Contribuição em termos de energia térmica das principais estratégias passivas implementadas		Não considerada	kWh/a	
	Necessidades de energia para aquecimento (1)		5184	kWh/a	
	Necessidades de energia para arrefecimento		Negligenciadas	kWh/a	
	Necessidades de energia para preparação de AQS		2377	kWh/a	
	Necessidades de energia para o sistema urbano de aquecimento e arrefecimento		Não existem	kWh/a	
	Outras necessidades de energia (humidificação, desumidificação)		Não consideradas	kWh/a	
	Necessidades de energia para ventilação		Não existem	kWh/a	
	Necessidades de energia para iluminação no interior		Não aplicável	kWh/a	
	Outras necessidades de energia (aparelhos, iluminação exterior, sistemas auxiliares, etc.)		Não aplicável	kWh/a	
Geração de energia no edifício	Energia térmica de fontes renováveis (p. ex., coletores solares térmicos)		0	kWh/a	
	Energia elétrica gerada no edifício e utilizada <i>in situ</i>		0	kWh/a	
	Energia elétrica gerada no edifício e exportada para o mercado		0	kWh/a	
Consumo de energia	Energia final fornecida	Eletricidade	5184	kWh/a	
		Combustíveis fósseis	3962	kWh/a	
		Outras formas (biomassa, aquecimento/arrefecimento urbano, etc.)	0	kWh/a	
	Energia primária		16923	kWh/a	

(1) Consumo real estimado com base na aplicação de fator de redução de 0,54 (ou 54%) às necessidades de energia útil, inicialmente indicadas pelo método sazonal.

Edifício unifamiliar anterior a 1919 (Casa das Talhas) - parte A

Cálculo	Método e instrumentos	As estimativas das necessidades reais anuais de energia útil são determinadas de acordo com o método proposto no capítulo 3, baseado na EN ISO 13790:2008, considerando: a) Cada edifício e/ou fração autónoma do edifício como uma única zona, com as mesmas condições interiores de referência; b) A aplicação de fatores de redução de consumo às necessidades nominais de aquecimento estimadas pelo método sazonal; c) A determinação das necessidades energéticas para a preparação de AQS de acordo com o Despacho 15793-I/2013.		
	Fatores de conversão de energia primária	Eletricidade: 2,5 [kWh _{EP} /kWh]; Combustíveis sólidos, líquidos e gasosos não renováveis: 1,0 [kWh _{EP} /kWh]; Energia térmica de origem renovável: 1,0 [kWh _{EP} /kWh];		
Condições climáticas	Localização (latitude; longitude)		Coimbra (40,2287599; -8,4162744)	
	Graus-dias de aquecimento		1304 GD (HDD)	
	Graus-dias de arrefecimento		Não considerados CDD	
	Fonte de dados climáticos		Decreto-Lei 118/2013; Despacho 15793-F/2013	
	Descrição do terreno		Zona urbana; Foram considerados 20° de obstrução de horizonte	
Geometria do edifício	Comprimento x largura x altura (média)		10,91 x 10,91 x 2,85 m x m x m	
	Número de pisos		2 ---	
	Razão S/V (superfície/volume)		186,00/339,15 m ² /m ³	
	Porcentagem de área com janelas em relação à área total da envolvente do edifício	Sul	2,34	%
		Leste	1,61	%
		Norte	0,00	%
		Oeste	5,27	%
Orientação		0 °		
Ganhos internos	Utilização do edifício		Habitação unifamiliar	
	Ganho térmico médio devido aos ocupantes		4 (total) W/m ²	
	Potência elétrica do sistema de iluminação			
	Potência elétrica dos equipamentos elétricos			
Componentes do edifício	Coeficiente U médio da cobertura		2,100 W/m ² K	
	Coeficiente U médio das paredes		1,840 W/m ² K	
	Coeficiente U médio do pavimento		1,400 W/m ² K	
	Coeficiente U médio das janelas		5,100 W/m ² K	
	Pontes térmicas	Comprimento total	132,40	m
		Transmissão térmica linear média	0,53	W/mK
	Inércia térmica	Média	150 ≤ It ≤ 400	kg/m ²
	Tipos de sistemas de sombreamento		Portadas opacas interiores claras	
	Fator solar (g)	Vidros	0,85	---
		Vidros + sistemas de sombreamento	0,38	---
	Taxa de infiltração (renovações de ar por hora)	Mínimo de Inverno:	0,4	1/h
Mínimo de Verão:		0,6	1/h	

Edifício unifamiliar anterior a 1919 (Casa das Talhas) - parte B

Sistemas do edifício	Ventilação	Renovações de ar por hora	Não existe	1/h
		Eficiência da recuperação térmica	Não existe	%
	Aquecimento	Eficiência	100	%
	Arrefecimento	Eficiência	Não existe	
	AQS	Eficiência	60	%
	Sistema urbano de aquecimento e arrefecimento	Eficiência na geração	Não existe	%
Eficiência na distribuição		Não existe	%	
Parâmetros de regulação e escalonamento utilizados no edifício	Temperatura de regulação	Inverno	18	°C
		Verão	25	°C
	Humidade de regulação	Inverno	50	%
		Verão	50	%
	Escalonamento das operações e dos controlos	Ocupantes	O valor de 4 [W/m ²] para os ganhos térmicos internos inclui os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes e o calor dissipado nos equipamentos e nos dispositivos de iluminação	
		Iluminação		
		Aparelhos		
		Ventilação	Natural	
		Sistema de aquecimento	Entram em funcionamento sempre que a temperatura do espaço ultrapassa as temperaturas de regulação	
		Sistema de arrefecimento	Não existe	
Necessidades / utilização de energia do edifício	Contribuição em termos de energia térmica das principais estratégias passivas implementadas		Não considerada	kWh/a
	Necessidades de energia para aquecimento (1)		8567	kWh/a
	Necessidades de energia para arrefecimento		Negligenciadas	kWh/a
	Necessidades de energia para preparação de AQS		2377	kWh/a
	Necessidades de energia para o sistema urbano de aquecimento e arrefecimento		Não existem	kWh/a
	Outras necessidades de energia (humidificação, desumidificação)		Não consideradas	kWh/a
	Necessidades de energia para ventilação		Não existem	kWh/a
	Necessidades de energia para iluminação no interior		Não aplicável	kWh/a
	Outras necessidades de energia (aparelhos, iluminação exterior, sistemas auxiliares, etc.)		Não aplicável	kWh/a
Geração de energia no edifício	Energia térmica de fontes renováveis (p. ex., coletores solares térmicos)		0	kWh/a
	Energia elétrica gerada no edifício e utilizada <i>in situ</i>		0	kWh/a
	Energia elétrica gerada no edifício e exportada para o mercado		0	kWh/a
Consumo de energia	Energia final fornecida	Eletricidade	8567	kWh/a
		Combustíveis fósseis	3962	kWh/a
		Outras formas (biomassa, aquecimento/arrefecimento urbano, etc.)	0	kWh/a
	Energia primária		25381	kWh/a

(1) Consumo real estimado com base na aplicação de fator de redução de 0,66 (ou 66%) às necessidades de energia útil, inicialmente indicadas pelo método sazonal.

Edifício unifamiliar anterior a 1919 (Casa das Talhas) - parte A

Cálculo	Método e instrumentos	As estimativas das necessidades reais anuais de energia útil são determinadas de acordo com o método proposto no capítulo 3, baseado na EN ISO 13790:2008, considerando: a) Cada edifício e/ou fração autónoma do edifício como uma única zona, com as mesmas condições interiores de referência; b) A aplicação de fatores de redução de consumo às necessidades nominais de aquecimento estimadas pelo método sazonal; c) A determinação das necessidades energéticas para a preparação de AQS de acordo com o Despacho 15793-I/2013.		
	Fatores de conversão de energia primária	Eletricidade: 2,5 [kWh _{EP} /kWh]; Combustíveis sólidos, líquidos e gasosos não renováveis: 1,0 [kWh _{EP} /kWh]; Energia térmica de origem renovável: 1,0 [kWh _{EP} /kWh];		
Condições climáticas	Localização (latitude; longitude)	Almeida (40,1829919; -7,4449645)		
	Graus-dias de aquecimento	1924	GD (HDD)	
	Graus-dias de arrefecimento	Não considerados	CDD	
	Fonte de dados climáticos	Decreto-Lei 118/2013; Despacho 15793-F/2013		
	Descrição do terreno	Zona urbana; Foram considerados 20° de obstrução de horizonte		
Geometria do edifício	Comprimento x largura x altura (média)	10,91 x 10,91 x 2,85	m x m x m	
	Número de pisos	2	---	
	Razão S/V (superfície/volume)	186,00/339,15	m ² /m ³	
	Percentagem de área com janelas em relação à área total da envolvente do edifício	Sul	2,34	%
		Leste	1,61	%
		Norte	0,00	%
		Oeste	5,27	%
Orientação	0	°		
Ganhos internos	Utilização do edifício	Habitação unifamiliar		
	Ganho térmico médio devido aos ocupantes	4 (total)	W/m ²	
	Potência elétrica do sistema de iluminação			
	Potência elétrica dos equipamentos elétricos			
Componentes do edifício	Coeficiente U médio da cobertura	2,100	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das paredes	1,840	W/m ² K	
	Coeficiente U médio do pavimento	1,400	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das janelas	5,100	W/m ² K	
	Pontes térmicas	Comprimento total	132,40	m
		Transmissão térmica linear média	0,53	W/mK
	Inércia térmica	Média	150 ≤ It ≤ 400	kg/m ²
	Tipos de sistemas de sombreamento	Portadas opacas interiores claras		
	Fator solar (g)	Vidros	0,85	---
		Vidros + sistemas de sombreamento	0,38	---
	Taxa de infiltração (renovações de ar por hora)	Mínimo de Inverno:	0,4	1/h
Mínimo de Verão:		0,6	1/h	

Edifício unifamiliar anterior a 1919 (Casa das Talhas) - parte B

Sistemas do edifício	Ventilação	Renovações de ar por hora	Não existe	1/h	
		Eficiência da recuperação térmica	Não existe	%	
	Aquecimento	Eficiência	100	%	
	Arrefecimento	Eficiência	Não existe		
	AQS	Eficiência	60	%	
	Sistema urbano de aquecimento e arrefecimento	Eficiência na geração	Não existe	%	
Eficiência na distribuição		Não existe	%		
Parâmetros de regulação e escalonamento utilizados no edifício	Temperatura de regulação	Inverno	18	°C	
		Verão	25	°C	
	Humidade de regulação	Inverno	50	%	
		Verão	50	%	
	Escalonamento das operações e dos controlos	Ocupantes	O valor de 4 [W/m ²] para os ganhos térmicos internos inclui os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes e o calor dissipado nos equipamentos e nos dispositivos de iluminação		
		Iluminação			
		Aparelhos			
		Ventilação	Natural		
		Sistema de aquecimento	Entram em funcionamento sempre que a temperatura do espaço ultrapassa as temperaturas de regulação		
		Sistema de arrefecimento	Não existe		
Necessidades / utilização de energia do edifício	Contribuição em termos de energia térmica das principais estratégias passivas implementadas		Não considerada	kWh/a	
	Necessidades de energia para aquecimento (1)		15229	kWh/a	
	Necessidades de energia para arrefecimento		Negligenciadas	kWh/a	
	Necessidades de energia para preparação de AQS		2377	kWh/a	
	Necessidades de energia para o sistema urbano de aquecimento e arrefecimento		Não existem	kWh/a	
	Outras necessidades de energia (humidificação, desumidificação)		Não consideradas	kWh/a	
	Necessidades de energia para ventilação		Não existem	kWh/a	
	Necessidades de energia para iluminação no interior		Não aplicável	kWh/a	
	Outras necessidades de energia (aparelhos, iluminação exterior, sistemas auxiliares, etc.)		Não aplicável	kWh/a	
Geração de energia no edifício	Energia térmica de fontes renováveis (p. ex., coletores solares térmicos)		0	kWh/a	
	Energia elétrica gerada no edifício e utilizada <i>in situ</i>		0	kWh/a	
	Energia elétrica gerada no edifício e exportada para o mercado		0	kWh/a	
Consumo de energia	Energia final fornecida	Eletricidade	15229	kWh/a	
		Combustíveis fósseis	3962	kWh/a	
		Outras formas (biomassa, aquecimento/arrefecimento urbano, etc.)	0	kWh/a	
	Energia primária		42034	kWh/a	

(1) Consumo real estimado com base na aplicação de fator de redução de 0,68 (ou 68%) às necessidades de energia útil, inicialmente indicadas pelo método sazonal.

Edifício unifamiliar construído entre 1961 e 1990 - parte A

Cálculo	Método e instrumentos	As estimativas das necessidades reais anuais de energia útil são determinadas de acordo com o método proposto no capítulo 3, baseado na EN ISO 13790:2008, considerando: a) Cada edifício e/ou fração autónoma do edifício como uma única zona, com as mesmas condições interiores de referência; b) A aplicação de fatores de redução de consumo às necessidades nominais de aquecimento estimadas pelo método sazonal; c) A determinação das necessidades energéticas para a preparação de AQS de acordo com o Despacho 15793-I/2013.		
	Fatores de conversão de energia primária	Eletricidade: 2,5 [kWh _{EP} /kWh]; Combustíveis sólidos, líquidos e gasosos não renováveis: 1,0 [kWh _{EP} /kWh]; Energia térmica de origem renovável: 1,0 [kWh _{EP} /kWh];		
Condições climáticas	Localização (latitude; longitude)	Amarante (41,2693112; -8,0800385)		
	Graus-dias de aquecimento	1570	GD (HDD)	
	Graus-dias de arrefecimento	Não considerados	CDD	
	Fonte de dados climáticos	Decreto-Lei 118/2013; Despacho 15793-F/2013		
	Descrição do terreno	Zona urbana; Foram considerados 20° de obstrução de horizonte		
Geometria do edifício	Comprimento x largura x altura	10,00 x 10,00 x 2,70	m x m x m	
	Número de pisos	1	---	
	Razão S/V (superfície/volume)	108,00/270,00	m ² /m ³	
	Porcentagem de área com janelas em relação à área total da envolvente do edifício	Sul	3,50	%
		Leste	3,50	%
		Norte	3,50	%
		Oeste	3,50	%
Orientação	0	°		
Ganhos internos	Utilização do edifício	Habitação unifamiliar		
	Ganho térmico médio devido aos ocupantes	4 (total)	W/m ²	
	Potência elétrica do sistema de iluminação			
	Potência elétrica dos equipamentos elétricos			
Componentes do edifício	Coeficiente U médio da cobertura	2,800	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das paredes	1,300	W/m ² K	
	Coeficiente U médio do pavimento	1,650	W/m ² K	
	Coeficiente U médio das janelas	4,100	W/m ² K	
	Pontes térmicas	Comprimento total	140,80	m
		Transmissão térmica linear média	0,54	W/mK
	Inércia térmica	Média	150 ≤ I _t ≤ 400	kg/m ²
	Tipos de sistemas de sombreamento		Portadas opacas interiores claras	
	Fator solar (g)	Vidros	0,85	---
		Vidros + sistemas de sombreamento	0,30	---
Taxa de infiltração (renovações de ar por hora)	Mínimo de Inverno:	0,4	1/h	
	Mínimo de Verão:	0,6	1/h	

Edifício unifamiliar construído entre 1961 e 1990 - parte B

Sistemas do edifício	Ventilação	Renovações de ar por hora	Não existe	1/h
		Eficiência da recuperação térmica	Não existe	%
	Aquecimento	Eficiência	100	%
	Arrefecimento	Eficiência	Não existe	
	AQS	Eficiência	60	%
	Sistema urbano de aquecimento e arrefecimento	Eficiência na geração	Não existe	%
Eficiência na distribuição		Não existe	%	
Parâmetros de regulação e escalonamento utilizados no edifício	Temperatura de regulação	Inverno	18	°C
		Verão	25	°C
	Humidade de regulação	Inverno	50	%
		Verão	50	%
	Escalonamento das operações e dos controlos	Ocupantes	O valor de 4 [W/m ²] para os ganhos térmicos internos inclui os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes e o calor dissipado nos equipamentos e nos dispositivos de iluminação	
		Iluminação		
		Aparelhos		
		Ventilação	Natural	
		Sistema de aquecimento	Entram em funcionamento sempre que a temperatura do espaço ultrapassa as temperaturas de regulação	
		Sistema de arrefecimento	Não existe	
Necessidades / utilização de energia do edifício	Contribuição em termos de energia térmica das principais estratégias passivas implementadas		Não considerada	kWh/a
	Necessidades de energia para aquecimento (1)		2156	kWh/a
	Necessidades de energia para arrefecimento		Negligenciadas	kWh/a
	Necessidades de energia para preparação de AQS		2377	kWh/a
	Necessidades de energia para o sistema urbano de aquecimento e arrefecimento		Não existem	kWh/a
	Outras necessidades de energia (humidificação, desumidificação)		Não consideradas	kWh/a
	Necessidades de energia para ventilação		Não existem	kWh/a
	Necessidades de energia para iluminação no interior		Não aplicável	kWh/a
	Outras necessidades de energia (aparelhos, iluminação exterior, sistemas auxiliares, etc.)		Não aplicável	kWh/a
Geração de energia no edifício	Energia térmica de fontes renováveis (p. ex., coletores solares térmicos)		0	kWh/a
	Energia elétrica gerada no edifício e utilizada <i>in situ</i>		0	kWh/a
	Energia elétrica gerada no edifício e exportada para o mercado		0	kWh/a
Consumo de energia	Energia final fornecida	Eletricidade	2156	kWh/a
		Combustíveis fósseis	3962	kWh/a
		Outras formas (biomassa, aquecimento/arrefecimento urbano, etc.)	0	kWh/a
	Energia primária		9352	kWh/a

(1) Consumo real estimado com base na aplicação de fator de redução de 0,20 (ou 20%) às necessidades de energia útil, inicialmente indicadas pelo método sazonal.

Anexo III – Quadro dos edifícios de existentes - requisitos aplicáveis

Edifícios de referência (renovação profunda, sem substituição de sistemas de aquecimento)

Edifícios existentes	Localização: graus-dias de aquecimento - GD	Desempenho energético médio: necessidades de energia primária em [kWh/(m ² .a)] (antes do investimento) (2)	Coeficientes de transmissão térmica U [W/(m ² .°C)] (1)					
			Cobertura em contato com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas btr>0,7	Paredes em contato com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas btr>0,7	Paredes em contato com outros edifícios ou espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas btr≤0,7	Pavimento em contato com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas btr>0,7	Vãos envidraçados (portas e janelas)	Elementos em contato com o solo
1) Edifícios unifamiliares e suas subcategorias								
Anterior a 1960	1924	144,46 (3)	0,39 (0,25)	0,37 (0,30)	Não aplicável (0,60)	0,58 (0,25)	Não substituir (2,20)	Não aplicável (0,50)
	1570	123,25 (3)	0,49 (0,30)	0,46 (0,35)	Não aplicável (0,70)	0,58 (0,30)	Não substituir (2,40)	Não aplicável (0,50)
	987	88,69 (3)	0,49 (0,35)	0,62 (0,40)	Não aplicável (0,80)	0,58 (0,35)	Não substituir (2,80)	Não aplicável (0,50)
1961 - 1990	1570	91,04 (4)	0,21 (0,30)	0,22 (0,35)	Não aplicável (0,70)	Não estudado (0,30)	2,61 (2,40)	Não aplicável (0,50)
2) Edifício multifamiliar - dados de um apartamento								
Anterior a 1919	1924	353,22 (5)	0,23 (0,25)	0,26 (0,30)	0,26 (0,60)	0,34 (0,25)	1,53 (2,20)	Não aplicável (0,50)
	1304	213,28 (6)	0,23 (0,30)	0,30 (0,35)	0,30 (0,70)	0,42 (0,30)	Não substituir (2,40)	Não aplicável (0,50)
	987	142,21 (7)	0,26 (0,35)	0,45 (0,40)	0,45 (0,80)	0,55 (0,35)	Não substituir (2,80)	Não aplicável (0,50)

(1) Valores em vigor após 31/12/2015 à direita, entre parênteses. (4) Fator de redução de consumo aplicado: 0,200 (ou 20,0%). (6) Fator de redução de consumo aplicado: 0,660 (ou 66,0%).

(2) Consumos reais estimados com base na aplicação de fatores de redução às necessidades de energia útil, inicialmente indicadas pelo método sazonal.

(3) Fator de redução de consumo aplicado: 0,134 (ou 13,4%). (5) Fator de redução de consumo aplicado: 0,680 (ou 68,0%). (7) Fator de redução de consumo aplicado: 0,540 (ou 54,0%).

Edifícios de referência (renovação profunda, com substituição de sistemas de aquecimento)

Edifícios existentes	Localização: graus-dias de aquecimento - GD	Desempenho energético médio: necessidades de energia primária em [kWh/(m ² .a)] (antes do investimento) (2)	Coeficientes de transmissão térmica U [W/(m ² .°C)] (1)					
			Cobertura em contato com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas btr>0,7	Paredes em contato com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas btr>0,7	Paredes em contato com outros edifícios ou espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas btr≤0,7	Pavimento em contato com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas btr>0,7	Vãos envidraçados (portas e janelas)	Elementos em contato com o solo
1) Edifícios unifamiliares e suas subcategorias								
Anterior a 1960	1924	144,46 (3)	0,39 (0,25)	0,37 (0,30)	Não aplicável (0,60)	0,58 (0,25)	Não substituir (2,20)	Não aplicável (0,50)
	1570	123,25 (3)	0,49 (0,30)	0,62 (0,35)	Não aplicável (0,70)	0,58 (0,30)	Não substituir (2,40)	Não aplicável (0,50)
	987	88,69 (3)	0,49 (0,35)	0,62 (0,40)	Não aplicável (0,80)	0,58 (0,35)	Não substituir (2,80)	Não aplicável (0,50)
1961 - 1990	1570	91,04 (4)	0,39 (0,30)	0,41 (0,35)	Não aplicável (0,70)	Não estudado (0,30)	2,61 (2,40)	Não aplicável (0,50)
2) Edifício multifamiliar - dados de um apartamento								
Anterior a 1919	1924	353,22 (5)	0,31 (0,25)	0,60 (0,30)	0,60 (0,60)	0,55 (0,25)	Não substituir (2,20)	Não aplicável (0,50)
	1304	213,28 (6)	0,47 (0,30)	0,60 (0,35)	0,60 (0,70)	0,55 (0,30)	Não substituir (2,40)	Não aplicável (0,50)
	987	142,21 (7)	0,47 (0,35)	0,60 (0,40)	0,60 (0,80)	0,55 (0,35)	Não substituir (2,80)	Não aplicável (0,50)

(1) Valores em vigor após 31/12/2015 à direita, entre parênteses. (4) Fator de redução de consumo aplicado: 0,200 (ou 20,0%). (6) Fator de redução de consumo aplicado: 0,660 (ou 66,0%).

(2) Consumos reais estimados com base na aplicação de fatores de redução às necessidades de energia útil, inicialmente indicadas pelo método sazonal.

(3) Fator de redução de consumo aplicado: 0,134 (ou 13,4%). (5) Fator de redução de consumo aplicado: 0,680 (ou 68,0%). (7) Fator de redução de consumo aplicado: 0,540 (ou 54,0%).

Anexo IV – Quadro exemplo de medidas de eficiência - necessidades de energia

**Edifício unifamiliar anterior a 1960, localizado no Centro de Portugal
Amarante (41,2693112; -8,0800385) - 1570 GD (1) (2)**

U Cobertura [W/(m ² .°C)]	U Paredes [W/(m ² .°C)]	U Pavimento [W/(m ² .°C)]	U Janelas [W/(m ² .°C)]	Sistema de aquecimento - eficiência	Sistema de AQS - eficiência	Energia útil para aquecimento [kWh/(m ² .a)]	Energia primária para aquecimento [kWh/(m ² .a)]	Energia primária para AQS (3) [kWh/(m ² .a)]	Energia primária total [kWh/(m ² .a)]
2,800	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	34,44	86,10	37,15	123,25
2,800	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	34,44	37,15	26,85	64,00
2,800	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	34,44	20,02	28,57	48,60
2,800	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	34,44	0,00	0,00	0,00
2,800	2,000	1,650	2,385	4,30	0,78	34,25	19,91	28,57	48,48
2,800	2,000	1,650	1,800	0,93	0,83	33,85	36,52	26,85	63,37
2,800	2,000	1,650	1,800	4,30	0,78	33,85	19,68	28,57	48,26
2,800	2,000	1,650	1,800	0,92	0,92	33,85	0,00	0,00	0,00
2,800	2,000	1,650	2,453	0,93	0,83	33,74	36,40	26,85	63,25
2,800	2,000	1,650	2,453	4,30	0,78	33,74	19,62	28,57	48,19
2,800	2,000	1,650	2,453	0,92	0,92	33,74	0,00	0,00	0,00
2,800	2,000	1,650	2,080	0,93	0,83	33,46	36,09	26,85	62,95
2,800	2,000	1,650	2,080	4,30	0,78	33,46	19,45	28,57	48,03
2,800	2,000	1,650	2,080	0,92	0,92	33,46	0,00	0,00	0,00
2,800	2,000	1,650	1,870	0,93	0,83	33,35	35,98	26,85	62,83
2,800	2,000	1,650	1,870	4,30	0,78	33,35	19,39	28,57	47,96
2,800	2,000	1,650	1,870	0,92	0,92	33,35	0,00	0,00	0,00
2,800	2,000	0,695	5,100	0,93	0,83	30,60	33,01	26,85	59,86
2,800	2,000	0,695	5,100	4,30	0,78	30,60	17,79	28,57	46,36
2,800	2,000	0,695	5,100	0,92	0,92	30,60	0,00	0,00	0,00
2,800	2,000	0,582	5,100	0,93	0,83	30,15	32,52	26,85	59,37
2,800	2,000	0,582	5,100	0,92	0,92	30,15	0,00	0,00	0,00
2,800	0,750	1,650	5,100	0,93	0,83	27,80	29,99	26,85	56,84
2,800	0,750	1,650	5,100	4,30	0,78	27,80	16,16	28,57	44,73
2,800	0,750	1,650	5,100	0,92	0,92	27,80	0,00	0,00	0,00
2,800	0,621	1,650	5,100	0,93	0,83	27,11	29,25	26,85	56,10
2,800	0,621	1,650	5,100	4,30	0,78	27,11	15,76	28,57	44,34
2,800	0,621	1,650	5,100	0,92	0,92	27,11	0,00	0,00	0,00
2,800	0,462	1,650	5,100	0,93	0,83	26,27	28,34	26,85	55,19
2,800	0,462	1,650	5,100	4,30	0,78	26,27	15,27	28,57	43,85
2,800	0,462	1,650	5,100	0,92	0,92	26,27	0,00	0,00	0,00
2,800	0,367	1,650	5,100	0,93	0,83	25,77	27,80	26,85	54,65
2,800	0,367	1,650	5,100	4,30	0,78	25,77	14,98	28,57	43,56
2,800	0,367	1,650	5,100	0,92	0,92	25,77	0,00	0,00	0,00
2,800	0,305	1,650	5,100	0,93	0,83	25,44	27,44	26,85	54,29
2,800	0,305	1,650	5,100	4,30	0,78	25,44	14,79	28,57	43,36
2,800	0,305	1,650	5,100	0,92	0,92	25,44	0,00	0,00	0,00
2,800	0,261	1,650	5,100	0,93	0,83	25,21	27,19	26,85	54,04
2,800	0,261	1,650	5,100	4,30	0,78	25,21	14,65	28,57	43,23
2,800	0,261	1,650	5,100	0,92	0,92	25,21	0,00	0,00	0,00
2,800	0,228	1,650	5,100	0,93	0,83	25,03	27,00	26,85	53,85
2,800	0,228	1,650	5,100	4,30	0,78	25,03	14,55	28,57	43,13
2,800	0,228	1,650	5,100	0,92	0,92	25,03	0,00	0,00	0,00
2,800	0,202	1,650	5,100	0,93	0,83	24,90	26,86	26,85	53,71
2,800	0,202	1,650	5,100	4,30	0,78	24,90	14,47	28,57	43,05
2,800	0,202	1,650	5,100	0,92	0,92	24,90	0,00	0,00	0,00
2,800	0,182	1,650	5,100	0,93	0,83	24,79	26,74	26,85	53,59
2,800	0,182	1,650	5,100	4,30	0,78	24,79	14,41	28,57	42,98
2,800	0,182	1,650	5,100	0,92	0,92	24,79	0,00	0,00	0,00
0,840	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	24,60	61,49	37,15	98,63
0,840	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	24,60	26,53	26,85	53,38

**Edifício unifamiliar anterior a 1960, localizado no Centro de Portugal
Amarante (41,2693112; -8,0800385) - 1570 GD (1) (2)**

U Cobertura [W/(m ² .°C)]	U Paredes [W/(m ² .°C)]	U Pavimento [W/(m ² .°C)]	U Janelas [W/(m ² .°C)]	Sistema de aquecimento - eficiência	Sistema de AQS - eficiência	Energia útil para aquecimento [kWh/(m ² .a)]	Energia primária para aquecimento [kWh/(m ² .a)]	Energia primária para AQS (3) [kWh/(m ² .a)]	Energia primária total [kWh/(m ² .a)]
0,840	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	24,60	14,30	28,57	42,87
0,840	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	24,60	0,00	0,00	0,00
0,681	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	23,80	59,50	37,15	96,64
0,681	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	23,80	25,67	26,85	52,52
0,681	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	23,80	13,84	28,57	42,41
0,681	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	23,80	0,00	0,00	0,00
0,494	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	22,86	57,16	37,15	94,31
0,494	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	22,86	24,66	26,85	51,52
0,494	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	22,86	13,29	28,57	41,87
0,494	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	22,86	0,00	0,00	0,00
0,388	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	22,33	55,83	37,15	92,98
0,388	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	22,33	24,09	26,85	50,94
0,388	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	22,33	12,98	28,57	41,56
0,388	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	22,33	0,00	0,00	0,00
0,319	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	21,99	54,97	37,15	92,12
0,319	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	21,99	23,72	26,85	50,57
0,319	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	21,99	12,78	28,57	41,36
0,319	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	21,99	0,00	0,00	0,00
0,271	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	21,75	54,37	37,15	91,52
0,271	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	21,75	23,46	26,85	50,31
0,271	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	21,75	12,64	28,57	41,22
0,271	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	21,75	0,00	0,00	0,00
0,236	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	21,57	53,93	37,15	91,08
0,236	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	21,57	23,27	26,85	50,12
0,236	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	21,57	12,54	28,57	41,11
0,236	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	21,57	0,00	0,00	0,00
0,208	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	21,44	53,59	37,15	90,73
0,208	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	21,44	23,12	26,85	49,97
0,208	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	21,44	12,46	28,57	41,04
0,208	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	21,44	0,00	0,00	0,00
0,187	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	21,33	53,32	37,15	90,47
0,187	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	21,33	23,01	26,85	49,86
0,187	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	21,33	12,40	28,57	40,97
0,187	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	21,33	0,00	0,00	0,00
0,681	0,621	1,650	5,100	1,00	0,60	16,54	41,34	37,15	78,49
0,494	0,750	1,650	5,100	1,00	0,60	16,29	40,72	37,15	77,87
0,681	0,462	1,650	5,100	1,00	0,60	15,71	39,27	37,15	76,41
0,494	0,621	1,650	5,100	1,00	0,60	15,61	39,03	37,15	76,18
0,681	0,367	1,650	5,100	1,00	0,60	15,22	38,04	37,15	75,18
0,388	0,621	1,650	5,100	1,00	0,60	15,09	37,72	37,15	74,87
0,494	0,462	1,650	5,100	1,00	0,60	14,79	36,96	37,15	74,11
0,319	0,621	1,650	5,100	1,00	0,60	14,75	36,88	37,15	74,02
0,494	0,367	1,650	5,100	1,00	0,60	14,30	35,74	37,15	72,88
0,388	0,462	1,650	5,100	1,00	0,60	14,26	35,66	37,15	72,80
0,494	0,305	1,650	5,100	1,00	0,60	13,97	34,93	37,15	72,08
0,319	0,462	1,650	5,100	1,00	0,60	13,93	34,81	37,15	71,96
0,388	0,367	1,650	5,100	1,00	0,60	13,77	34,43	37,15	71,58
0,271	0,462	1,650	5,100	1,00	0,60	13,69	34,22	37,15	71,37
0,388	0,305	1,650	5,100	1,00	0,60	13,45	33,63	37,15	70,77
0,319	0,367	1,650	5,100	1,00	0,60	13,44	33,59	37,15	70,74

(1) Características originais do edifício (cenário BAU) na linha identificada com fundo cinzento.

(2) Seleção de 25 pacotes de medidas por sistema de aquecimento, num total de 100 pacotes ordenados por necessidades de energia útil.

(3) Necessidades de energia útil para preparação de AQS são iguais para todos os cenários de reabilitação energética (22,29 [kWh/(m².a)]).

Anexo V – Quadro exemplo de medidas de eficiência – custo global e ROI

**Edifício unifamiliar anterior a 1960, localizado no Centro de Portugal
Amarante (41,2693112; -8,0800385) - 1570 GD (1) (2)**

U Cobertura [W/(m ² .°C)]	U Paredes [W/(m ² .°C)]	U Pavimento [W/(m ² .°C)]	U Janelas [W/(m ² .°C)]	Sistema de aquecimento - eficiência	Sistema de AQS - eficiência	Custo global [€/m ²]	Investimento inicial [€]	Investimento inicial [€/m ²]	ROI [%] em relação ao cenário de referência
2,800	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	191,89	(3) 2094,11	(3) 26,17	-----
2,800	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	132,95	3352,97	41,91	375%
0,840	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	143,13	5214,70	65,18	125%
0,681	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	142,78	5277,67	65,97	123%
0,494	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	143,07	5403,62	67,55	118%
0,388	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	143,96	5529,58	69,12	112%
2,800	0,750	1,650	5,100	0,93	0,83	149,32	5320,82	66,51	106%
0,319	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	145,13	5655,53	70,69	105%
2,800	0,621	1,650	5,100	0,93	0,83	149,19	5387,38	67,34	104%
0,271	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	146,45	5781,48	72,27	99%
2,800	0,462	1,650	5,100	0,93	0,83	149,71	5520,51	69,01	98%
2,800	0,367	1,650	5,100	0,93	0,83	150,74	5653,65	70,67	92%
0,236	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	147,87	5907,43	73,84	92%
0,208	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	149,35	6033,38	75,42	86%
2,800	0,305	1,650	5,100	0,93	0,83	152,03	5786,77	72,33	86%
0,187	2,000	1,650	5,100	0,93	0,83	150,87	6159,34	76,99	81%
2,800	0,261	1,650	5,100	0,93	0,83	153,45	5919,90	74,00	80%
2,800	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	149,54	6350,55	79,38	80%
2,800	2,000	1,650	2,080	0,93	0,83	159,93	5432,28	67,90	77%
2,800	0,228	1,650	5,100	0,93	0,83	154,97	6053,04	75,66	75%
2,800	0,202	1,650	5,100	0,93	0,83	156,55	6186,16	77,33	69%
2,800	2,000	1,650	1,870	0,93	0,83	161,84	5583,57	69,79	69%
2,800	0,182	1,650	5,100	0,93	0,83	158,16	6319,30	78,99	64%
2,800	2,000	1,650	2,453	0,93	0,83	164,18	5712,02	71,40	61%
2,800	2,000	0,695	5,100	0,93	0,83	162,45	5992,03	74,90	60%
2,800	2,000	1,650	1,800	0,93	0,83	165,19	5774,10	72,18	58%
2,800	2,000	0,582	5,100	0,93	0,83	162,97	6081,30	76,02	58%
2,800	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	156,35	8690,44	108,63	43%
0,494	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	181,43	4144,77	51,81	41%
0,388	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	181,37	4270,72	53,38	39%
0,681	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	182,80	4018,82	50,24	38%
0,319	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	181,92	4396,67	54,96	35%
0,840	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	166,91	8212,28	102,65	33%
0,681	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	167,14	8275,26	103,44	32%
0,840	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	184,56	3955,84	49,45	32%
0,494	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	168,11	8401,21	105,02	30%
0,271	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	182,82	4522,62	56,53	30%
0,388	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	169,39	8527,16	106,59	28%
2,800	0,750	1,650	5,100	4,30	0,78	170,76	8318,40	103,98	27%
2,800	0,621	1,650	5,100	4,30	0,78	171,13	8384,96	104,81	26%
0,319	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	170,81	8653,11	108,16	26%
0,236	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	183,93	4648,58	58,11	25%
2,800	0,462	1,650	5,100	4,30	0,78	172,26	8518,09	106,48	24%
0,271	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	172,31	8779,06	109,74	23%
2,800	0,367	1,650	5,100	4,30	0,78	173,66	8651,23	108,14	22%
0,236	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	173,86	8905,02	111,31	21%
0,208	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	185,16	4774,53	59,68	20%
2,800	0,305	1,650	5,100	4,30	0,78	175,19	8784,35	109,80	20%
0,208	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	175,43	9030,97	112,89	19%
2,800	2,000	1,650	2,080	4,30	0,78	177,23	8429,87	105,37	19%
2,800	0,261	1,650	5,100	4,30	0,78	176,79	8917,49	111,47	18%

Edifício unifamiliar anterior a 1960, localizado no Centro de Portugal
Amarante (41,2693112; -8,0800385) - 1570 GD (1) (2)

U Cobertura [W/(m ² .°C)]	U Paredes [W/(m ² .°C)]	U Pavimento [W/(m ² .°C)]	U Janelas [W/(m ² .°C)]	Sistema de aquecimento - eficiência	Sistema de AQS - eficiência	Custo global [€/m ²]	Investimento inicial [€]	Investimento inicial [€/m ²]	ROI [%] em relação ao cenário de referência
0,840	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	173,96	10552,17	131,90	17%
0,187	2,000	1,650	5,100	4,30	0,78	177,03	9156,92	114,46	17%
0,681	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	174,21	10615,15	132,69	17%
2,800	2,000	1,650	1,870	4,30	0,78	179,22	8581,16	107,26	16%
2,800	0,228	1,650	5,100	4,30	0,78	178,43	9050,62	113,13	15%
0,494	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	175,21	10741,10	134,26	15%
0,187	2,000	1,650	5,100	1,00	0,60	186,49	4900,48	61,26	15%
0,494	0,462	1,650	5,100	1,00	0,60	183,95	6312,31	78,90	15%
0,388	0,462	1,650	5,100	1,00	0,60	183,92	6438,26	80,48	15%
0,494	0,367	1,650	5,100	1,00	0,60	184,13	6445,45	80,57	14%
0,388	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	176,50	10867,05	135,84	14%
0,388	0,367	1,650	5,100	1,00	0,60	184,10	6571,40	82,14	14%
0,494	0,621	1,650	5,100	1,00	0,60	184,88	6179,18	77,24	14%
0,388	0,621	1,650	5,100	1,00	0,60	184,85	6305,13	78,81	13%
2,800	0,202	1,650	5,100	4,30	0,78	180,10	9183,75	114,80	13%
0,319	0,462	1,650	5,100	1,00	0,60	184,50	6564,21	82,05	13%
2,800	0,750	1,650	5,100	0,92	0,92	177,73	10658,29	133,23	13%
0,681	0,462	1,650	5,100	1,00	0,60	185,28	6186,36	77,33	13%
2,800	2,000	1,650	2,453	4,30	0,78	181,27	8709,61	108,87	13%
2,800	0,621	1,650	5,100	0,92	0,92	178,12	10724,85	134,06	13%
0,494	0,305	1,650	5,100	1,00	0,60	184,85	6578,57	82,23	13%
0,319	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	177,93	10993,00	137,41	13%
0,319	0,367	1,650	5,100	1,00	0,60	184,68	6697,35	83,72	13%
0,388	0,305	1,650	5,100	1,00	0,60	184,83	6704,52	83,81	12%
0,681	0,367	1,650	5,100	1,00	0,60	185,45	6319,49	78,99	12%
0,319	0,621	1,650	5,100	1,00	0,60	185,43	6431,08	80,39	12%
2,800	2,000	0,695	5,100	4,30	0,78	181,85	8989,61	112,37	12%
2,800	2,000	1,650	1,800	4,30	0,78	182,20	8771,68	109,65	12%
2,800	0,462	1,650	5,100	0,92	0,92	179,27	10857,98	135,72	12%
0,681	0,621	1,650	5,100	1,00	0,60	186,22	6053,22	75,67	11%
0,494	0,750	1,650	5,100	1,00	0,60	186,20	6112,62	76,41	11%
0,271	0,462	1,650	5,100	1,00	0,60	185,41	6690,17	83,63	11%
2,800	0,182	1,650	5,100	4,30	0,78	181,80	9316,88	116,46	11%
0,271	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	179,43	11118,95	138,99	11%
2,800	2,000	1,650	2,385	4,30	0,78	182,97	8806,21	110,08	11%
2,800	0,367	1,650	5,100	0,92	0,92	180,68	10991,12	137,39	10%
0,236	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	180,98	11244,91	140,56	10%
2,800	0,305	1,650	5,100	0,92	0,92	182,22	11124,24	139,05	9%
0,208	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	182,56	11370,86	142,14	8%
2,800	2,000	1,650	2,080	0,92	0,92	184,07	10769,76	134,62	7%
2,800	0,261	1,650	5,100	0,92	0,92	183,82	11257,38	140,72	7%
0,187	2,000	1,650	5,100	0,92	0,92	184,17	11496,81	143,71	7%
2,800	0,228	1,650	5,100	0,92	0,92	185,47	11390,51	142,38	6%
2,800	2,000	1,650	1,870	0,92	0,92	186,06	10921,05	136,51	5%
2,800	0,202	1,650	5,100	0,92	0,92	187,15	11523,64	144,05	4%
2,800	2,000	1,650	2,453	0,92	0,92	188,10	11049,50	138,12	3%
2,800	2,000	0,695	5,100	0,92	0,92	188,75	11329,51	141,62	3%
2,800	0,182	1,650	5,100	0,92	0,92	188,85	11656,77	145,71	3%
2,800	2,000	1,650	1,800	0,92	0,92	189,03	11111,57	138,89	3%
2,800	2,000	0,582	5,100	0,92	0,92	189,61	11418,78	142,73	2%

(1) Características originais do edifício (cenário BAU) na linha identificada com fundo cinzento.

(2) Seleção de 25 pacotes de medidas por sistema de aquecimento, num total de 100 pacotes ordenados por retorno sobre o investimento (ROI).

(3) O valor alocado em investimento inicial para o cenário BAU considera a substituição dos sistemas originais, num ciclo de vida de 20 anos.

Anexo VI – Quadro dos custos de energia

Preços de energia [€/kWh] - cenário de referência

Ano	Eletricidade		Gás natural		Pellets	
	FIN	MAC	FIN	MAC	FIN	MAC
2015	0,2390	0,1166	0,1032	0,0839	0,0492	0,0400
2016	0,2473	0,1207	0,1068	0,0868	0,0509	0,0414
2017	0,2559	0,1249	0,1105	0,0899	0,0527	0,0428
2018	0,2649	0,1293	0,1144	0,0930	0,0545	0,0443
2019	0,2741	0,1338	0,1184	0,0963	0,0564	0,0459
2020	0,2741	0,1338	0,1184	0,0963	0,0564	0,0459
2021	0,2741	0,1338	0,1184	0,0963	0,0564	0,0459
2022	0,2741	0,1338	0,1184	0,0963	0,0564	0,0459
2023	0,2741	0,1338	0,1184	0,0963	0,0564	0,0459
2024	0,2741	0,1338	0,1184	0,0963	0,0564	0,0459
2025	0,2752	0,1343	0,1189	0,0966	0,0567	0,0461
2026	0,2763	0,1349	0,1193	0,0970	0,0569	0,0463
2027	0,2774	0,1354	0,1198	0,0974	0,0571	0,0464
2028	0,2785	0,1359	0,1203	0,0978	0,0573	0,0466
2029	0,2796	0,1365	0,1208	0,0982	0,0576	0,0468
2030	0,2796	0,1365	0,1208	0,0982	0,0576	0,0468
2031	0,2796	0,1365	0,1208	0,0982	0,0576	0,0468
2032	0,2796	0,1365	0,1208	0,0982	0,0576	0,0468
2033	0,2796	0,1365	0,1208	0,0982	0,0576	0,0468
2034	0,2796	0,1365	0,1208	0,0982	0,0576	0,0468
2035	0,2780	0,1357	0,1201	0,0976	0,0572	0,0465
2036	0,2764	0,1349	0,1194	0,0971	0,0569	0,0463
2037	0,2748	0,1341	0,1187	0,0965	0,0566	0,0460
2038	0,2732	0,1333	0,1180	0,0959	0,0562	0,0457
2039	0,2716	0,1326	0,1173	0,0954	0,0559	0,0455
2040	0,2711	0,1323	0,1171	0,0952	0,0558	0,0454
2041	0,2705	0,1320	0,1168	0,0950	0,0557	0,0453
2042	0,2700	0,1318	0,1166	0,0948	0,0556	0,0452
2043	0,2694	0,1315	0,1164	0,0946	0,0555	0,0451
2044	0,2689	0,1312	0,1161	0,0944	0,0554	0,0450
2045	0,2697	0,1316	0,1165	0,0947	0,0555	0,0451
2046	0,2705	0,1320	0,1168	0,0950	0,0557	0,0453
2047	0,2713	0,1324	0,1172	0,0953	0,0559	0,0454
2048	0,2721	0,1328	0,1175	0,0956	0,0560	0,0456
2049	0,2730	0,1332	0,1179	0,0959	0,0562	0,0457
2050	0,2738	0,1336	0,1183	0,0961	0,0564	0,0458

Fonte dos percentuais de reajuste: Eurostat – *UE energy trends to 2050* [58]