



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

Avaliação da rentabilidade económica de medidas de reabilitação energética em edifícios multifamiliares anteriores a 1960

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

Márcio Paulo Ferreira Gonçalves

Orientador

Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões

Professor Doutor António José Barreto Tadeu

Esta dissertação 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

Colaboração institucional



Coimbra, Julho, 2013

*“Eu sei que o meu trabalho é uma gota no oceano,
mas sem ele o oceano seria menor”*

Madre Teresa de Calcutá

AGRADECIMENTOS

Dada a essência e o cariz enriquecedor desta obra académica, perduram contributos que não podem, nem devem, deixar de ser aludidos. Deste modo, expressos os meus sinceros agradecimentos:

Aos meus orientadores, pela disponibilidade manifestada para orientar esta dissertação e por todo o apoio, sugestões e esclarecimentos prestados durante a elaboração deste trabalho.

Ao Engenheiro Sérgio Tadeu, com o qual tive o prazer de trabalhar, pela partilha de conhecimento concedido e por todo o seu interesse e apoio na realização desta dissertação. Agradeço também ao colega João Ribeiro, cujo tema de dissertação, nos permitiu um trabalho conjunto e uma partilha de esforços e contribuições.

À Universidade do Minho, na pessoa do Arquiteto Marco Ferreira, pelos orçamentos e informações disponibilizadas.

A todos os meus colegas e amigos, que tanta confiança depositam em mim, agradeço cada minuto compartilhado, cada sorriso, cada alegria, cada momento único que guardarei com saudade, porque foram essenciais para o meu êxito académico e porque o serão na minha vida futura.

À minha família por todo o carinho e apoio demonstrado, em especial, aos meus pais por me transmitirem valores indispensáveis pelos quais, hoje, reajo a minha vida e por todo o esforço realizado para me proporcionar o êxito desta etapa.

Por último, mas não menos importante, à minha namorada, fonte de motivação e de apoio incondicional, pela ajuda, paciência e carinho demonstradas para comigo durante este árduo período.

A todos um eterno obrigado...

RESUMO

A União Europeia tem revelado um esforço no sentido de promover políticas de eficiência energética relacionadas com todos os setores de atividade, procurando dinamizar a exploração de fontes de energia renováveis, apoiando a autossuficiência energética e estimulando a redução do consumo de energia obtida através de combustíveis fósseis. Sabe-se, hoje em dia, que uma significativa parcela (cerca de 40%) do consumo energético na União Europeia se deve aos edifícios, e sabe-se, igualmente, que este sector é responsável pela emissão de cerca de um terço do dióxido de carbono.

A Diretiva 2010/31/EU dedicada à eficiência energética de edifícios representa um novo passo no sentido do aumento da eficiência energética dos edifícios, estabelecendo novas metas, mais ambiciosas, e incentivando os Estados-Membros a adotar medidas concretas que permitam uma maior poupança de energia nos edifícios. Prevê-se também a valorização gradual da promoção de eficiência energética dos edifícios existentes.

Enquadrado nestas prioridades e de acordo com a metodologia proposta no Regulamento Delegado nº244/2012, o presente trabalho procura avaliar a rentabilidade económica de medidas de reabilitação energética, em edifícios multifamiliares anteriores a 1960 em Portugal. Serão estudadas medidas ao nível de isolamento da envolvente, dos vãos envidraçados, dos sistemas de aquecimento, arrefecimento e de preparação de águas quentes sanitárias, bem como a inclusão de energias renováveis. Para uma análise representativa do território nacional, considera-se as zonas climáticas de Coimbra, Évora, Porto e Bragança.

Os resultados corroboram que o investimento em medidas de eficiência energética pode revelar-se rentável ao fim de trinta anos. A alteração da localização do edifício pode alterar o ponto de custo-ótimo devido à elevada flutuação das necessidades energéticas. As opções renováveis, embora reduzam significativamente o consumo de energia primária, não demonstram economias monetárias substanciais. Conclui-se também, que os níveis ótimos de rentabilidade obtidos encontram-se bastante desfasados dos requisitos mínimos de desempenho energético.

ABSTRACT

The European Union has unveiled an effort to promote energy efficiency policies related to all sectors of activity, looking for stimulate the exploration of renewable energy sources, supporting energy self-sufficiency and encouraging the reduction of energy consumption achieved by fossil fuels. It is known today that a significant portion (about 40%) of the energy consumption in the European Union is due to buildings, and it is also known that this sector is responsible for approximately one third of the carbon dioxide emissions.

The Directive 2010/31/EU, dedicated to energy efficiency in buildings, represents a new step towards increasing the energy efficiency of buildings, establishing new targets, more ambitious, and encouraging the Member States to take concrete steps to allow better ways of energy savings in buildings. It is also expected a gradual promotion of energy efficiency of the existing buildings.

Framed in these priorities and in accordance with the methodology proposed in the Commission Delegated Regulation No. 244/2012, this paper seeks to assess economic profitability of energy rehabilitation measures in multifamily buildings before 1960 in Portugal. Measures will be studied at the level of insulation, glazing, heating, cooling and hot water systems, as well as the inclusion of renewable energy. For a representative analysis of the national territory, is considered climatic zones of Coimbra, Évora, Porto and Bragança.

The results corroborates that investment in energy efficiency measures may become profitable after thirty years. Changing the location of the building can change the point of cost-optimal due to the fluctuation of the energy needs. The renewable options, although the consumption of primary energy is significantly reduce, do not show substantial monetary savings. It was also concluded that the cost-optimal levels obtained are quite lagged of the energy performance requirements.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	vii
ABREVIATURAS	viii
SIMBOLOGIA	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	5
1.3 Estrutura do documento	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3 METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DE RENTABILIDADE ECONÓMICA	21
3.1 Introdução	21
3.2 Definição do edifício de referência.....	22
3.3 Definição das medidas de eficiência energética	24
3.4 Cálculo das necessidades de energia primária	25
3.5 Cálculo do custo global.....	28
3.5.1 Cálculo do modelo financeiro	30
3.5.2 Cálculo do modelo macroeconómico	31
4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	32
4.1 Definição do edifício de referência.....	32
4.2 Medidas de eficiência energética estudadas	33
4.2.1 Isolamento da envolvente	34
4.2.2 Vãos envidraçados	34
4.2.3 Equipamentos	35
4.2.4 Energias renováveis.....	38
4.3 Necessidades de energia primária.....	43
4.4 Cálculo do custo global.....	45
5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	48
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Parque edificado na Europa [7].....	3
Figura 1.2 – Edifícios segundo a época de construção em Portugal [8].....	3
Figura 1.3 – Níveis de consumo médio no aquecimento de habitações unifamiliares por ano de construção, em kWh/(m ² .ano) [7].....	4
Figura 3.1 – Fases de implementação da metodologia de custo-ótimo	22
Figura 3.2 – Exemplo de curva de custo ótimo	29
Figura 4.1 – Exemplo do painel solar térmico.....	39
Figura 4.2 – Exemplo de salamandra a <i>pellets</i> considerada no estudo.....	42
Figura 4.3 – Cálculo do valor residual de um componente de um edifício [31]	45
Figura 4.4 – Preços de eletricidade em €/kWh, incluindo taxas [52].....	46
Figura 5.1 – Curva de custo ótimo dos PMP.....	50
Figura 5.2 – Curvas de custo ótimo na perspetiva macroeconómica dos PMI 1 a PMI 6.....	53
Figura 5.3 – Curvas de custo ótimo na perspetiva macroeconómica dos PMI 7 a PMI 13.....	54
Figura 5.4 – Curvas de custo ótimo na perspetiva macroeconómica dos PMJ	56
Figura 5.5 – Curva de custo ótimo dos PMF.....	58
Figura 5.6 – Análise de sensibilidade aos preços de energia e taxas de desconto na perspetiva macroeconómica	62
Figura 5.7 – Análise de sensibilidade aos preços de energia e taxas de desconto na perspetiva financeira	62

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Fatores de conversão da energia elétrica em energia primária em kWh _{EP} /kWh [22].....	15
Quadro 2.2 – Fatores de conversão para energia primária em kWh _{EP} /kWh [23].....	15
Quadro 2.3 – Percentagem de energias renováveis no consumo final de energia [24]	16
Quadro 2.4 – Percentagem de FER em aquecimento e arrefecimento [24]	16
Quadro 2.5 – Percentagem de produção de eletricidade a partir de FER [24]	16
Quadro 2.6 – Comparação do investimento no sistema fotovoltaico em 2010 e em 2012	18
Quadro 2.7 – Síntese de recomendações relativas à metodologia de custo ótimo	20
Quadro 4.1 – Características do edifício de referência localizado em Coimbra	33
Quadro 4.2 – Características técnicas do equipamento solar térmico	39
Quadro 4.3 – Contributo anual do solar térmico em kWh.....	39
Quadro 4.4 – Contributo anual dos painéis solares em kWh.....	41
Quadro 4.5 – Dados climáticos.....	44
Quadro 4.6 – Síntese das taxas de desconto selecionadas	46
Quadro 4.7 – Preços de energia no ano inicial	47
Quadro 5.1 – Descrição dos pacotes de medidas para análise preliminar (PMP)	48
Quadro 5.2 – Necessidades energéticas dos PMP	49
Quadro 5.3 – Custos iniciais, de exploração e totais dos PMP	50
Quadro 5.4 – Comparação do nível ótimo do PMP 1 com os requisitos mínimos.....	51
Quadro 5.5 – Descrição dos pacotes de medidas para análise do isolamento térmico (PMI) .	52
Quadro 5.6 – Comparação do nível ótimo dos PMI com os requisitos mínimos	55
Quadro 5.7 – Descrição dos pacotes de medidas para análise dos envidraçados (PMJ).....	55
Quadro 5.8 – Comparação do nível ótimo dos PMJ com os requisitos mínimos.....	56
Quadro 5.9 – Descrição dos pacotes de medidas para análise final (PMF).....	57
Quadro 5.10 – Custos globais dos PMF na perspectiva macroeconómica e financeira.....	60
Quadro 5.11 – Comparação do nível ótimo do PMF 8 com os requisitos mínimos.....	61
Quadro 5.12 – Análise de sensibilidade macroeconómica aos requisitos mínimos dos PMF.	63
Quadro 5.13 – Análise de sensibilidade financeira aos requisitos mínimos dos PMF.....	63

ABREVIATURAS

ADENE – Agência para a Energia

AQS – Águas Quentes Sanitárias

CE – Comissão Europeia

COP – *Coefficient of Performance*

EER – *Energy Efficiency Ratio*

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*

EPS – Poliestireno expandido moldado

FER – Fontes de Energias Renováveis

GEE – Gases com Efeito de Estufa

INE – Instituto Nacional de Estatística

IVA – Imposto sobre o Valor Acrescentado

MW – Lã mineral

NZEB – *Net Zero Energy Buildings*

PMF (i) – Pacote de medidas nº i da análise final

PMI (i) – Pacote de medidas nº i da análise aos isolamentos

PMJ (i) – Pacote de medidas nº i da análise às janelas

PMP (i) – Pacote de medidas nº i da análise preliminar

PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

PNAER – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis

PVC – Policloreto de vinilo

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RCLE – Regime de Comércio de Licenças de Emissão

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior no Edifícios

UE – União Europeia

XPS – Poliestireno extrudido

SIMBOLOGIA

°C – Graus Celsius

A – Área, em m²

cm – Centímetros

CO₂ – Dióxido de carbono

kg – Quilogramas

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

kWh – Quilowatt-hora

kWh_{EP} – Quilowatt-hora de energia primária

kWp – Quilowatt-pico

l – Litros

m² – Metros quadrados

mm – Milímetros

N – Norte

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_{EP}/m².ano

N_{tc} – Necessidades nominais globais de energia primária, em kWh_{EP}/(m².ano)

N_{vc} – Necessidades de energia útil para arrefecimento, em kWh/(m².ano)

O – Oeste

P_u – Potência útil, em kW

Q_a – Necessidades de energia útil para produção de águas quentes sanitária em kWh/(m².ano)

S – Sul

tCO₂/MWh – toneladas de CO₂ por megawatt-hora

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

W – Watt

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e motivação

O desenvolvimento económico verificado nas últimas décadas, acompanhado por uma crescente necessidade de bem-estar e pelo aumento populacional, desencadeou uma enorme pressão sobre os recursos naturais. O aumento significativo do custo da energia, os recursos limitados e escassos, e ainda os impactos ambientais gerados pelo consumo de energia, como por exemplo, as emissões de gases com efeito de estufa (GEE), conduzem à necessidade de uma gestão cuidada e racional do uso de energia.

Segundo os últimos dados do Parlamento Europeu, o consumo de energia na Europa recai em cerca de 40% no setor residencial [1], enquanto em Portugal o setor de edifícios representa 30% do consumo total de energia, 13% para o setor de serviços e 17% para o setor residencial [2].

Desta forma, o setor dos edifícios, onde passamos cerca de 80% a 90% das nossas vidas segundo a Organização Mundial de Saúde, revela tal importância no consumo de energia que a Comissão Europeia tem realizado um esforço para promover políticas que impulsionem a eficiência energética dos edifícios. Para o efeito, a Comissão Europeia (CE) traçou metas ambiciosas como a conhecida UE 20-20-20 em que estabeleceu três objetivos fulcrais a atingir em 2020, são eles: uma redução de 20% das emissões de gases de efeito de estufa relativamente aos níveis de 1990; uma melhoria de 20% na eficiência energética; e por último, um aumento da cota de consumo energético produzida a partir de fontes de energia renováveis (FER) para 20% [3]. De referir que a Comissão Europeia estabelece também como objetivo, a redução dos níveis de emissões de gases com efeito de estufa em 80-95% em 2050, comparativamente a 1990 [4].

Como se constata, é unânime a necessidade de atuar no setor dos edifícios, para atender a este aumento de exigências que se tornam vitais para o equilíbrio do planeta. A reabilitação energética nos edifícios existentes poderá representar uma redução bastante considerável no consumo energético e consequentemente nas emissões de dióxido de carbono (CO₂). O CO₂ é um dos principais gases que contribui para o efeito estufa e, consequentemente para o

aquecimento global. É libertado essencialmente através da combustão de combustíveis fósseis necessários, por exemplo, para a produção de eletricidade que utilizamos nas nossas habitações.

Urge a necessidade de adotar medidas energeticamente mais eficazes e fomentar a utilização de recursos renováveis, sem nunca descorar os critérios de rentabilidade económica que se revelam indispensáveis. Em Portugal, vigoram instrumentos de planeamento estratégico que estabelecem o modo e os meios para alcançar os compromissos internacionais assumidos pelo país, em matéria de eficiência energética e de utilização de energia proveniente de fontes renováveis, são eles 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 nos vários setores de atividade, tendo em conta a realidade nacional [5]. Ao nível dos edifícios, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) impõe condições 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.

Estes instrumentos políticos pretendem então traçar uma estratégia sustentável de eficiência energética e de exploração de recursos renováveis, contribuindo para uma economia competitiva e de baixo carbono, ao abrigo do panorama político, económico e tecnológico que marcará a Europa na próxima década. Em suma, se todos os Estados-Membros centrarem esforços para políticas desta natureza, para além de contribuir para um planeta mais sustentável, também contribuirá para a poupança de recursos monetários de todos os cidadãos.

Deste modo, a necessidade de considerar critérios de rentabilidade no estudo de medidas de reabilitação energética, procurando um equilíbrio entre investimento e os custos de energia economizados ao longo do tempo, é aspeto fulcral no auxílio da tomada de decisão. A metodologia de cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade é definida pelo Regulamento Delegado nº 244/2012 [6].

Os edifícios podem ser classificados em: residenciais e não residenciais (escritórios, comércio, museus, edifícios de serviços, etc.). Os edifícios residenciais constituem grande parte da ocupação do solo da União Europeia (UE), representando cerca de 75% do total de edificações como se pode observar na Figura 1.1, realçando a importância de abordar este tipo de edifícios no presente estudo. A tipologia abordada recai sobre edifícios multifamiliares, isto é, apartamentos residenciais que como se verifica na Figura 1.1 representam 36% do parque habitacional europeu.

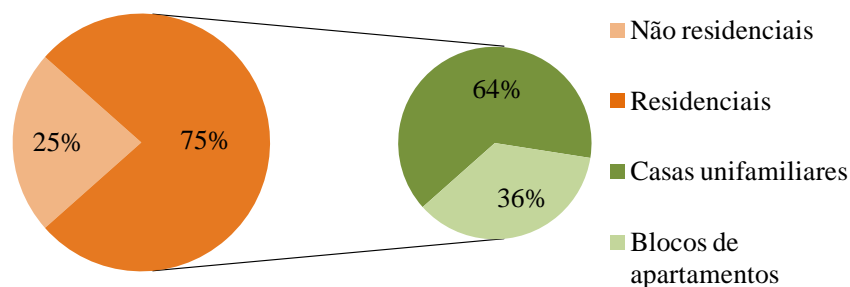


Figura 1.1 – Parque edificado na Europa [7]

Em Portugal, grande percentagem do parque edificado foi construído entre 1961 e 1990, como se pode observar na Figura 1.2, onde se verifica que cerca de 42% das habitações portuguesas pertencem a este período. No entanto, as edificações anteriores a 1960, que também apresentam uma percentagem considerável (29%) dos edifícios, poderão representar uma maior economia de energia, pois de acordo com a Figura 1.3, as habitações anteriores a 1960 apresentam valores muito elevados de consumos energéticos para aquecimento. Como tal, o estudo de medidas de reabilitação energética em edifícios datados anteriormente a 1960 faz sentido e será objeto do presente trabalho.

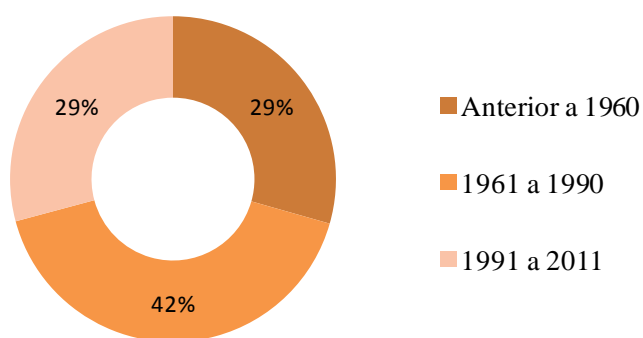


Figura 1.2 – Edifícios segundo a época de construção em Portugal [8]

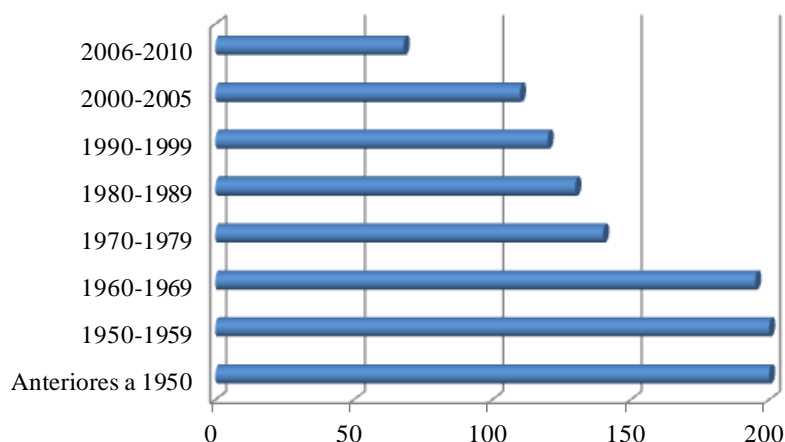


Figura 1.3 – Níveis de consumo médio no aquecimento de habitações unifamiliares por ano de construção, em kWh/(m².ano) [7]

Em Portugal, a dinâmica construtiva das últimas décadas fez com que uma parte muito significativa do parque habitacional seja relativamente jovem, o que determina que os índices de envelhecimento sejam relativamente baixos [9]. No entanto, especialmente nas grandes cidades, verifica-se a existência de um parque edificado bastante debilitado, na maioria dos casos devido à falta de implementação de medidas de conservação e/ou de manutenção [10], ou seja, apresentando problemas de salubridade e de conforto térmico. Portanto, é essencial atuar na reabilitação energética de edifícios anteriores a 1960, com base num conhecimento técnico fundamentado que permita aumentar o conforto dos habitantes, diminuir a fatura energética e garantir condições de salubridade e desempenho satisfatório da habitação.

Acima de tudo, devem sensibilizar-se os donos-de-obra para a escolha de medidas de reabilitação a aplicar, baseadas no comportamento global do edifício a intervir. Deve referir-se que não existem soluções tipificadas em reabilitação. Pelo contrário, as medidas a aplicar devem ter em conta uma série de fatores que, para além do capital financeiro disponível, podem, e devem, incluir o grau de degradação dos elementos, os sistemas de climatização (existentes ou aplicar), as características construtivas do edifício, etc. Apenas desta forma a reabilitação pode contribuir para a dinamização do sector da construção e para o desenvolvimento sustentável das cidades [10].

Aliado a esta realidade e sabendo que o setor de edifícios é um dos grandes responsáveis pelo consumo de energia, como foi referido anteriormente, torna-se essencial e urgente a intervenção nesta área. As políticas de fomento de eficiência energética e de utilização de energia renovável em vigor atualmente motivam e realçam a importância deste estudo. Posto isto, o presente trabalho centra-se no estudo da rentabilidade económica de medidas de

eficiência energética, tornando os edifícios mais sustentáveis e reduzindo a atual dependência energética.

De facto a realidade europeia serve de grande motivação à realização de um estudo desta índole, pois “Economizando energia, a Europa contribuirá para resolver os problemas resultantes das mudanças climáticas, do consumo crescente e da sua dependência em relação aos combustíveis fósseis importados de países terceiros (...) A eficiência energética é crucial para a Europa: se agirmos já, o custo direto do nosso consumo de energia poderá ser reduzido em mais de 100 mil milhões de euros até 2020 e evitaremos também produzir cerca de 780 milhões de toneladas de CO₂ anualmente.” declarou o Comissário Europeu Andris Piebalgs em Outubro de 2006 [11].

É neste contexto que surge esta dissertação, em que se prevê que o estudo de medidas de reabilitação energética de soluções construtivas seja aspeto impactante na nova abordagem de valorização da eficiência energética dos edifícios existentes, nomeadamente os multifamiliares anteriores a 1960. A definição de tais soluções só fará sentido assentando em critérios de rentabilidade económica e tendo em conta a realidade atual.

1.2 Objetivos

O presente estudo propõe-se a analisar soluções de reabilitação energética em edifícios multifamiliares anteriores a 1960 em Portugal, tendo em conta a aplicação da metodologia de determinação de rentabilidade económica, num período de 30 anos. Sucintamente, com este trabalho ambiciona-se:

- Aplicar/avaliar a metodologia de determinação de rentabilidade económica, presente no Regulamento Delegado nº244/2012 [6]. Pretende-se analisar algumas medidas de eficiência energética adequadas para a reabilitação de um edifício residencial multifamiliar. Procura-se também identificar as principais dificuldades na aplicação da metodologia, bem como, os fatores que exercem maior influência no cálculo;
- Selecionar um edifício de referência, que represente as dimensões e características típicas do parque edificado habitacional em Portugal, no que diz respeito à tipologia identificada;

- Selecionar as medidas de eficiência energética. Numa primeira fase, procurar-se-á gerar de forma avulsa, mas criteriosa, alguns pacotes de medidas de eficiência energética e identificar as medidas mais rentáveis no período de cálculo. Posteriormente é realizado um refinamento das medidas com maior rentabilidade, com o intuito de avaliar a influência do incremento de energias renováveis.
- Calcular as necessidades energéticas resultante da aplicação das medidas, aplicando a metodologia de cálculo do desempenho energético de edifícios adequada. Nesta fase procura-se também analisar e comparar as diferenças de cálculos resultantes das alterações da localização do edifício, cujas zonas climáticas definidas foram Coimbra, Porto, Évora e Bragança.
- Calcular o custo global, expresso em valor líquido atualizado, determinando o nível ótimo de custo para a aplicação das medidas de reabilitação no edifício de referência;
- Realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados, considerando diferentes taxas de desconto e diferentes cenários de evolução do custo de energia.
- E por último, comparar os resultados do custo ótimo com os requisitos mínimos de desempenho energético previstos no RCCTE.

1.3 Estrutura do documento

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos principais, procurando transmitir de forma clara e sucinta todos os aspetos abordados.

No presente capítulo, "*Introdução*", realizou-se uma introdução à temática subjacente a este estudo, tendo-se efetuado um breve enquadramento, a identificação dos objetivos propostos pela Comissão Europeia nesta área de atuação, bem como, a motivação que dá origem a este trabalho. Deste modo, apresentou-se de uma forma genérica as razões que levam à necessidade da realização deste estudo e identificaram-se, de modo sucinto, os objetivos a que se propõe esta dissertação.

No segundo capítulo, “*Revisão Bibliográfica*”, apresenta-se uma revisão bibliográfica de estudos desenvolvidos nesta área, quer nacionais, quer internacionais. Procura-se também, fornecer ao leitor uma ideia da evolução legislativa que ocorreu nos últimos anos, e que dá ênfase à necessidade de atuar no setor de edifícios.

No terceiro capítulo, “*Metodologia de Determinação de Rentabilidade Económica*”, expõe-se as metodologias que irão ser empregues neste estudo, designadamente o Regulamento Delegado nº244/2012 [6] que serve de complemento à Diretiva 2010/31/EU [1]. Neste capítulo, procura-se então, abordar e esclarecer todos os parâmetros necessários à realização deste tipo de estudo, bem como, as ferramentas e metodologias necessárias na realização dos cálculos.

O capítulo 4, “*Aplicação da Metodologia*”, procura identificar a forma como a metodologia descrita no capítulo anterior foi aplicada, detalhando, o edifício de referência, as medidas selecionadas e todos os parâmetros considerados nos cálculos.

Exposta a metodologia e detalhada a sua forma de implementação, segue-se no quinto capítulo, “*Discussão de Resultados*”, a apresentação e análise dos resultados obtidos. Neste capítulo, pretende-se, de forma estruturada e sequencial, apresentar todos os resultados obtidos e as suas respetivas análises.

No sexto capítulo, “*Considerações Finais*”, explanam-se as considerações finais da presente dissertação. Tais conclusões são produto da análise e discussão dos resultados obtidos no capítulo anterior. Além disso, refere-se também algumas sugestões de possíveis trabalhos futuros.

No sétimo e último capítulo, “*Referências Bibliográficas*”, expõe-se as referências bibliográficas citadas no presente documento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se a evolução legislativa da temática subjacente ao estudo, salientando-se as principais mudanças legislativas que acompanham as crescentes exigências impostas pela União Europeia, no que diz respeito ao setor residencial. Do mesmo modo evidencia-se alguns trabalhos desenvolvidos anteriormente, quer na Europa, quer em Portugal.

Em 1991, surge a primeira regulamentação, RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios, tendo como objetivo estabelecer regras de projeto de edifícios, de modo a garantir as exigências de conforto térmico sem consumos excessivos de energia e evitar patologias [12]. Este regulamento marca o início da preocupação com os recursos energéticos ao nível do setor de edifícios.

A 16 de Dezembro de 2002 é aprovada a Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios, cujo objetivo é promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios na comunidade, tendo em conta as condições climáticas externas e locais, bem como as exigências em matéria de clima interior e de rentabilidade económica [13]. A Diretiva 2002/91/UE, conhecida na literatura por *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) foi um instrumento essencial no que diz respeito ao desempenho energético dos edifícios, pois estabelece requisitos mínimos para edifícios novos e existentes, adota uma metodologia de cálculo de desempenho energético e implementa a certificação energética.

No seguimento das exigências e considerações da EPBD mencionada anteriormente, impunha-se que o RCCTE fosse atualizado em termos de um nível de exigências adequado ao atual contexto social, económico e energético, promovendo um novo acréscimo de qualidade térmica dos edifícios. Surge então na legislação portuguesa a revisão do RCCTE através do Decreto-Lei nº 80/2006 [14].

O RCCTE veio estabelecer requisitos de qualidade para os novos e existentes edifícios de habitação, nomeadamente ao nível das características da envolvente (paredes, envidraçados, pavimentos e coberturas), limitando as perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos. Este regulamento impõe limites aos consumos energéticos da habitação para climatização e produção de águas quentes, num claro incentivo à utilização de sistemas mais eficientes, com menor impacto em termos de consumo de energia primária. A nova legislação

determina também a obrigatoriedade da instalação de coletores solares e valoriza a utilização de outras fontes de energia renovável na determinação do desempenho energético do edifício [15].

A reformulação da EPBD acontece a 19 de Maio de 2010 com a Diretiva 2010/31/UE [1], que procura clarificar e reforçar as disposições da anterior. Introduce uma nova abordagem nos requisitos energéticos e da qualidade da envolvente, reforça os requisitos técnicos mínimos e introduz o conceito *Net Zero Energy Buildings* (NZEB). Este conceito traduz edifícios mais autossuficientes, isto é, com necessidades de energia quase nulas. A reformulação estabelece que os Estados-Membros devem assegurar os requisitos mínimos de desempenho energético em edifícios, com vista a alcançar níveis de custo ótimo usando uma metodologia comparativa estabelecida.

Assim, com intuito de estabelecer uma metodologia comparativa para o cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios, é publicado a 16 de Janeiro de 2012, o Regulamento Delegado nº244/2012 [6], que serve de complemento à Diretiva 2010/31/UE. Este regulamento tem então como principal objetivo, o estabelecimento de um quadro metodológico comparativo, a ser utilizado pelos Estados-Membros, para o cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios novos e existentes. Considera a fase de exploração, quer ao nível dos custos associados de investimento e de manutenção, como também ao nível dos custos de energia.

Salientados os principais instrumentos de regulamentação a nível Europeu e Nacional, segue-se a análise a alguns trabalhos relevantes que dado o contexto da problemática, são bastante atuais e diversificados.

Procurando avaliar o impacto económico das poupanças energéticas em edifícios novos na Bélgica, G. Verbeeck e H. Hens [16], consideraram dois níveis de medidas de reabilitação. Em primeiro lugar, analisam as medidas para reduzir as necessidades energéticas da habitação, como o isolamento do telhado, fachada e piso, e melhoramento de envidraçados. Em segundo lugar, combinam essas medidas com os melhores sistemas de aquecimento e sistemas de energias renováveis, com o intuito de reduzir o consumo de energia. Este trabalho foca essencialmente a procura de um ótimo microeconómico, ou seja, pretende o equilíbrio entre custos e benefícios.

Considerando um ciclo de vida de 30 anos, foi determinado o custo de investimento das medidas de eficiência energética e o custo anual de energia. Analisaram as medidas individualmente e concluíram que dependendo do orçamento disponível e do benefício

económico esperado, a implementação de medidas de poupança de energia pode ser transmitida ao longo do tempo. Sendo que a maioria das medidas podem ser aplicadas independentemente, devem seguir a seguinte ordem hierárquica de importância:

- isolamento no telhado;
- isolamento no piso, se facilmente acessível;
- melhorar o desempenho dos envidraçados (no caso de reabilitação, os caixilhos necessitam sempre de ser substituídos);
- sistemas de aquecimento mais eficientes;
- sistemas de energia renovável.

De realçar que a introdução de energias renováveis no edifício melhora substancialmente o seu desempenho energético, mas o seu custo inicial elevado afasta a solução de um ótimo económico.

Existem inúmeras soluções construtivas para realizar a reabilitação energética de um edifício. Como tal, Micaela Siva, em 2008, apresentou uma dissertação em que propôs o estudo de diferentes soluções construtivas, de forma a obter uma maior eficiência energética de um edifício multifamiliar, localizado na zona climática II,V1 [17]. A metodologia utilizada baseou-se no cálculo dos vários coeficientes de transmissão térmica, para os elementos da envolvente, nas diferentes soluções construtivas.

Como resultados, constatou que pela análise dos diferentes isolantes térmicos, o poliestireno extrudido (XPS) apresenta a melhor relação custo-eficácia. Quanto aos vãos envidraçados, concluiu que, vidros duplos, caixa-de-ar mais espessa, inclusão de gás árgon na caixa-de-ar e características melhoradas dos vidros (capas metálicas) são os fatores mais preponderantes na diminuição do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados. Dado que na estação de aquecimento, é mais vantajoso ter vidros com coeficientes de transmissão térmica baixos, reduzindo as perdas, e sabendo que na estação de arrefecimento a situação inverte-se, pois é benéfico utilizar um coeficiente de transmissão térmico elevado e um fator solar baixo, concluiu-se que se deve procurar um equilíbrio entre o coeficiente de transmissão térmica e o fator solar do vidro. Relativamente à caixilharia, foi feito um estudo para as necessidades energéticas, considerando caixilharia em alumínio, PVC ou madeira. Concluiu-se que não representam opções relevantes para as necessidades de aquecimento, nem para as necessidades globais de energia primária. Verificou-se também que os sombreamentos provenientes de palas e obstáculos constituem uma mais-valia para a redução das necessidades de Verão em cerca de 55%. A não colocação do sistema solar térmico, cujo seu período de retorno foi estimado entre quatro a cinco anos, agrava as necessidades globais de energia primária em cerca de 60%.

Pode-se finalizar que a escolha de sistemas de aquecimento, de arrefecimento e de preparação de AQS serão os grandes responsáveis pelo desempenho energético do edifício. A envolvente opaca e os envidraçados, embora contribuam para reduzir as necessidades energéticas, não têm tanta relevância para cálculo do desempenho energético e atribuição da respetiva classe energética.

G. Kumbaro e R. Madlener [18] realizaram um estudo com o objetivo de encontrar o melhor conjunto de medidas de reabilitação. Procuraram também introduzir uma análise técnica da possibilidade de adiar o investimento na reabilitação. O estudo considerou um prédio de administração pública construído em 1900, em Aachen, Alemanha. Como se trata de um monumento histórico, a gama de medidas de eficiência energética que possam ser implementadas é limitada pelos aspetos arquitetónicos e estéticos relevantes. Os aspetos técnicos, de potencial melhoramento, foram previamente analisados noutros estudos [18], originando um conjunto de medidas de reabilitação tecnicamente viáveis. Para o exterior do edifício, estas incluem o isolamento do telhado, o isolamento pelo exterior das paredes, o isolamento no teto da cave, bem como, a substituição de janelas. Quanto aos sistemas de aquecimento, quatro sistemas distintos foram considerados: uma caldeira de condensação a óleo; uma caldeira de condensação a gás; uma bomba de calor elétrica; e uma caldeira a *pellets*. A metodologia presente neste estudo recai essencialmente numa vertente de análise económica, em que procura estudar a influência das incertezas no preço da energia, verificando vários cenários e estimativas.

Com este estudo confirmou-se que as reabilitações energéticas estão sujeitas a grande incerteza, devido ao preço da energia e aos incentivos governamentais, que complicam de certa forma a determinação de custos ótimos de investimento. Os resultados do estudo revelam que:

- mudanças no preço da energia afetam significativamente a rentabilidade dos investimentos em reabilitações;
- o aumento de renda, legalmente permitido na Alemanha (11%) não justifica a opção de reabilitação energética por parte dos proprietários;
- se os preços de energia permanecerem moderados, não há vantagem de adiar a reabilitação da envolvente do edifício; e
- no caso de preços altamente instáveis, o adiamento do investimento torna-se a opção mais rentável.

Tais conclusões identificam as dificuldades que esta temática acarreta e como será de esperar, os resultados terão sempre uma determinada incerteza e ambiguidade, dada a instabilidade de diversos fatores, como por exemplo, o preço da eletricidade e a sua difícil previsão.

Nikolaidis *et al.*[19] com o objetivo de propor uma variedade de medidas de poupança de energia num edifício existente, classificou as diversas intervenções estudadas de acordo com a sua importância, tendo em vista a sua viabilidade económica. Este trabalho centrou-se numa casa isolada na Grécia Central, considerada como construção típica desta região, no entanto não é considerado como sendo um edifício referência na Grécia. A habitação utiliza uma resistência elétrica com 20 anos de idade para aquecimento e um esquentador elétrico para preparação de AQS. As paredes não possuem qualquer tipo de isolamento ($U=2.3W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$) e as janelas têm um coeficiente de transmissão térmica elevado ($U=5.6W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$). No que diz respeito à envolvente do edifício, foi considerado a substituição de janelas e caixilhos ($U=2.8W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$), e colocação de isolamento de poliestireno extrudido nas paredes, piso e cobertura. Estimou-se os custos de instalação e as respetivas poupanças energéticas e monetárias.

Estudou algumas melhorias do sistema de aquecimento, favorecendo a utilização de gás natural, quer para aquecimento, quer para AQS. A utilização de um controlador automático de temperatura é um fator que melhora consideravelmente os rendimentos dos equipamentos. Para arrefecimento estudaram alguns sistemas de ar condicionado com eficiências elevadas. Foram também introduzidas melhorias no sistema de iluminação artificial do edifício.

Utilizaram os quatro métodos mais comuns para realizar a avaliação económica das medidas aplicadas, são eles: o valor presente líquido; a taxa interna de retorno; o período de depreciação; e o rácio de investimento poupança. Conclui-se que usando o rácio de investimento poupança, a modernização da iluminação artificial é o investimento mais eficaz, sendo que, o isolamento e o sistema de controlo automático na caldeira surgem em seguida. A utilização de energia solar para aquecimento é rentável, ao contrário da substituição de janelas que demonstraram retornos de investimento muito baixos. Usando o método do valor presente líquido, torna-se evidente que o isolamento do telhado é uma das intervenções mais eficazes. A substituição de janelas revelou-se novamente pouco favorável.

Os regulamentos considerados nestas abordagens encontram-se sempre em constante avaliação e evolução. J. V. Ferreira e I. Domingos [20] realizaram um estudo com o objetivo de avaliar a consistência da legislação portuguesa de edifícios, nomeadamente o RCCTE e o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior no Edifícios (SCE), em termos de eficiência energética e desempenho ambiental. Este caso estudo foi centrado numa moradia T3 com área de $150m^2$, localizada em Manteigas, considerada uma zona climática extrema na estação de aquecimento (I3,V1). Várias combinações possíveis ao nível de aquecimento, arrefecimento e de AQS foram estudadas, assegurando sempre as mesmas condições de conforto interior exigidas pelo RCCTE. De notar que neste estudo não

foram considerados coletores solares térmicos ou outras fontes de energia renovável. Para comparar os vários cenários foi aplicado a metodologia proposta no RCCTE e SCE.

A eficiência energética e o desempenho ambiental da habitação dependem significativamente dos sistemas escolhidos para aquecimento, arrefecimento e AQS. Em termos de eficiência energética, o melhor cenário foi a casa com uma bomba de calor (aquecimento e refrigeração) e uma caldeira de parede a gás com pelo menos 100mm de isolamento de AQS. Esta solução apresentou uma classe energética B, de acordo com o SCE. O cenário intermédio era idêntico ao anterior, com exceção do sistema de aquecimento, que era baseado num recurso renovável (madeira), cuja classe energética obtida foi B-. O pior cenário foi a habitação que possui uma resistência elétrica para aquecimento, uma máquina de refrigeração para arrefecimento e um aquecedor elétrico com acumulador e isolamento inferior a 50mm para AQS, sendo rotulado com classe energética E.

Ana Gonçalves [21], nos estudos realizados na sua dissertação procurou elucidar as atuais exigências de desempenho energético segundo critérios de rentabilidade, de acordo com a metodologia apresentada pela Comissão Europeia no Regulamento nº 244/2012 [6]. Foi avaliado o impacto da variação das características do isolamento térmico na envolvente exterior de um edifício. E por último, foi desenvolvido o modelo financeiro e macroeconómico que possibilita a previsão do tempo de retorno do investimento. Nesta dissertação foi avaliado o impacto energético e económico das medidas de eficiência energética, considerando três zonas climáticas distintas (Bragança, Porto e Évora).

Os resultados provaram que, quando se aumenta o isolamento da envolvente, as necessidades de energia para arrefecimento aumentam, contudo o balanço é favorável ao incremento de mais isolamento. Confirmou-se também que as medidas que otimizam poupanças energéticas estão associadas a um aumento de custo da solução inicial. A solução relativa à aplicação de 6cm de isolamento no pavimento correspondeu à solução ótima dos requisitos mínimos de desempenho energético, a que corresponde um período de retorno do investimento inferior relativamente às restantes soluções.

Concluiu que a variabilidade dos resultados obtidos é demasiado elevada, devido à vasta diversidade de parâmetros que influenciam o desempenho energético dos edifícios. Sugere também que é necessário uma revisão dos parâmetros de cálculo e, conseqüentemente, dos limites máximos de energia exigidos na regulamentação atualmente em vigor em Portugal. Em suma, o trabalho centrou-se na implementação da metodologia proposta no Regulamento nº 244/2012 [6], em que o desempenho energético foi obtido mediante a aplicação do Decreto-Lei nº 80/2006 [14]. Além disso, usa uma fração de um edifício multifamiliar que,

embora tenha servido os objetivos da dissertação, não é representativo da construção em Portugal.

Débora Fernandes, em 2012, realizou uma dissertação que descreve a realidade da reabilitação de edifícios em Portugal [10]. Este trabalho consistiu em visitar 27 obras de reabilitação e de manutenção de edifícios, detetando as anomalias presentes e as soluções que visavam a melhoria do comportamento térmico-energético. Realizou também inquéritos aos donos-de-obra, empresas de construção e peritos qualificados do SCE, a fim de aferir o que normalmente é solicitado, sugerido e aplicado ao nível de medidas de melhoria do desempenho energético dos edifícios em Portugal. Constatou-se que os principais obstáculos à reabilitação são a falta de incentivos, aliada à falta de capacidade de investimento por parte dos proprietários.

Como conclusões dos inquéritos verificou-se que normalmente os donos-de-obra não definem as medidas a aplicar, ou seja, apenas indicam o que pretendem com a intervenção sendo que as escolhas ficam a cargo das empresas de construção e projetistas. A aplicação de coletores solares para preparação de AQS é a medida mais sugerida por parte dos técnicos qualificados, seguida pelo isolamento térmico da cobertura, pela substituição dos envidraçados e por último, o isolamento térmico das paredes. No entanto, os resultados dos inquéritos revelaram que as medidas mais aplicadas são a substituição de envidraçados, seguida da aplicação de isolamento térmico nas coberturas, e por fim, o isolamento das paredes exteriores. Relativamente às obras visitadas no referido estudo, constata-se que as medidas mais aplicadas são:

- aplicação de isolamento térmico exterior nas paredes;
- a cobertura, geralmente é demolida e construída com isolamento, sendo que a solução preferencial é isolamento na laje de esteira;
- os vãos envidraçados são os elementos mais substituídos, optando-se por colocar sistemas de batente e vidros duplos com caixilharia metálica com corte térmico;
- quanto à climatização, o mais comum em edifícios residenciais é sistema de aquecimento central ou pré-instalação de ar condicionado;
- fontes de energias renováveis, são apenas utilizadas para produção de AQS, sendo a sua utilização reduzida. Este facto deve-se, por um lado à falta de incentivos à aquisição e por outro, ao facto de, muitas vezes, ser impossível de modificar o desenho do edifício.

Conferido o estado do parque habitacional e a atualidade da reabilitação de edifícios constata-se, de forma mais abrangente, a importância que a temática abordada neste estudo pode acarretar para o país nos próximos anos. A possibilidade de economizar recursos monetários

ao longo de determinado período, podendo investir na sua habitação, é uma consciência que deve estar cada vez mais presente nos cidadãos.

Para efeitos do cálculo de otimização da rentabilidade, os resultados do desempenho energético devem ser expressos em metros quadrados de área útil de pavimento do edifício e referir-se ao consumo de energia primária, conforme sugere o Regulamento Delegado nº244/2012 [6]. Assim, o cálculo e definição dos fatores de conversão de energia útil em energia primária constituem um parâmetro bastante influente na aplicação da metodologia do custo ótimo. Como tal, cada país deve atualizar periodicamente os fatores de conversão para uma apreciação o mais realista possível. No Quadro 2.1 demonstram-se alguns dos fatores de conversão para eletricidade verificados em países europeus em 2011.

Quadro 2.1 – Fatores de conversão da energia elétrica em energia primária em kWh_{EP}/kWh [22]

	França	Alemanha	Holanda	Polónia	Espanha	Suécia	UK
% Energia Renovável	12.8%	10.3%	4.2%	2.7%	22.3%	50.2%	4.7%
Fator de conversão	2.58	2.6	2.56	3	2.6	2	2.92

Como se pode verificar, quanto maior a utilização de energias renováveis, menor deverá ser o fator de conversão de energia primária. Estudos mais recentes (2013) demonstram no Quadro 2.2 os seguintes fatores de conversão [23]:

Quadro 2.2 – Fatores de conversão para energia primária em kWh_{EP}/kWh [23]

	Alemanha	Polónia	Áustria
Eletricidade	2.6	3	2.62
Gás	1.1	1.1	1.17
Biomassa	0.2*	0.2*	1.08

* *pellets*

Segundo um estudo realizado pela Ecofys [22] considerar fatores de conversão de eletricidade baixos pode favorecer o uso de eletricidade e estimular o desuso de combustíveis fósseis. Considerando a rápida evolução do sistema elétrico, os fatores de conversão a utilizar necessitam de uma revisão regular, por exemplo, a cada 3 a 5 anos.

O incremento de energias renováveis nas construções tem vindo a revelar-se uma necessidade global, a fim de contribuir na redução do consumo de combustíveis fósseis e das emissões de

GEE. Neste aspeto, Portugal encontra-se numa situação favorável para atingir os objetivos propostos para 2020, como se pode observar no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Percentagem de energias renováveis no consumo final de energia [24]

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Objetivo 2020
UE-27	8.1	8.5	9.0	9.9	10.5	11.7	12.5	20.0
Portugal	19.2	19.6	20.8	22	23	24.6	24.6	31.0

Comparativamente com a média europeia, o uso de recursos renováveis para aquecimento e arrefecimento é bastante superior, como se observa no Quadro 2.4. No entanto, o setor do aquecimento e arrefecimento é um caso singular, pois não se projeta um aumento das contribuições das FER até 2020. Tal situação deve-se [25]:

- À previsível diminuição da contribuição da lenha no sector doméstico face à crescente introdução do gás natural neste sector;
- Ao aumento gradual da contribuição de outras tecnologias de aquecimento e arrefecimento, em especial do solar térmico, em linha com as previsões do PNAEE até 2020, as quais irão ter também algum efeito de substituição no consumo da lenha;
- À substituição de tecnologias de baixo rendimento por tecnologias com rendimentos muito superiores, o que faz necessariamente reduzir o consumo final de lenha.

Quadro 2.4 – Percentagem de FER em aquecimento e arrefecimento [24]

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
UE-27	9.6	10.0	10.6	11.8	12.3	13.6	14.3
Portugal	32.2	31.9	34.1	34.8	37.3	37.9	34.5

O PNEER projeta para 2020 um aumento de quota de energias renováveis no sector da eletricidade para 55.6% e como se verifica no Quadro 2.5, a produção de energia elétrica através de FER, tem vindo a crescer, o que poderá influenciar o fator de conversão de energia primária no futuro.

Quadro 2.5 – Percentagem de produção de eletricidade a partir de FER [24]

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
UE-27	14.1	14.7	15.2	15.9	16.7	18.8	19.6
Portugal	28.2	28.9	30	32.7	34.6	38.2	41.2

Com o objetivo de estimar os impactos do sistema integrado de fotovoltaicos em edifícios no Reino Unido, Hammond *et al.* desenvolveram um estudo [26] que visa avaliar o sistema em termos de análise energética, de ciclo de vida, e de custo-benefício. O sistema definido é um sistema de telha 2.1kWp mono-cristalino instalado numa propriedade nova, com tempo de vida de 25 anos e ligado à rede nacional, onde o governo prevê tarifas bonificadas para este tipo de eletricidade produzida. Estimaram que este tipo de painel, orientado a sul e com boa inclinação produz cerca 1720kWh por ano. Os resultados demonstraram claramente a importância de mecanismos de incentivo, tais como subsídios para que estes equipamentos se tornarem competitivos.

A produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos depende obviamente da localização e orientação dos painéis solares. Um estudo realizado em Las Vegas [27] concluiu que um sistema de fotovoltaicos de 3.19kWp orientado a sul pode gerar 5.982kWh por ano, tornando a habitação independente de energia elétrica. Os sistemas fotovoltaicos em Las Vegas provaram melhorar as relações custos-benefícios, quando os incentivos e descontos federais são considerados.

A necessidade de inovação tecnológica, tais como melhorias nos processos operacionais e de fabrico poderão contribuir para a evolução desta tecnologia. A redução das tarifas bonificadas ao longo do tempo, reduzindo os incentivos, incute a necessidade de adaptação do setor fotovoltaico ao mercado. Deste modo, o mercado de produção de painéis fotovoltaicos procurará processos e tecnologias para aumentar a eficiência dos equipamentos, em busca de rentabilidade económica nas condições atuais. Portanto, considera-se correto que as tarifas bonificadas não sejam fixas e elevadas ao longo dos anos.

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.* desenvolveram um trabalho [28] demonstrando 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 1000-1500kWh/kWp. Tendo em conta estes valores, a área necessária de painéis para atingir o objetivo NZEB varia entre 15 a 20% da área total de piso aquecido. Esta avaliação mostra como, com uma área relativamente pequena de módulos solares, se torna o conceito NZEB 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 retorno diminui de 18 anos para menos de 14 anos.

Num contexto nacional, a dissertação de mestrado de Pedro Andrade enfoca a questão da aplicação de energias renováveis na eficiência energética de edifícios [29]. Um dos objetivos do estudo era dimensionar um sistema fotovoltaico, localizado num edifício no Porto, para produzir eletricidade em regime bonificado. Como a legislação aplicada à microprodução é atualizada frequentemente, realizou-se uma comparação do regime em vigor em 2010 com o regime a vigorar em 2012, para um período de 10 anos. Como se verifica no Quadro 2.6, embora o preço do equipamento de geração de energia seja superior em 2010, o período de retorno do investimento é de 5 anos, enquanto em 2012, devido às menores tarifas praticadas, o retorno só acontece ao fim de 8 anos.

Quadro 2.6 – Comparação do investimento no sistema fotovoltaico em 2010 e em 2012

Ano	Orçamento do sistema [€]	Regime bonificado [€/kWh]	Produção anual [kWh]	Período de retorno	Proveito acumulado [€]
2010	19 359	0.585 (nos primeiros 5 anos) reduzindo nos restantes	5528	5 anos	25 133
2012	14 257	0.326 (nos primeiros 8 anos) e 0,185 (nos restantes)	5528	8 anos	16 462

No período de cálculo, 10 anos, verifica-se que o investimento realizado em 2010 é muito mais satisfatório devido ao valor elevado das tarifas bonificadas. Tendo em conta a queda do incentivo em regime bonificado, para que o investimento em fotovoltaicos não deixe de ser rentável, os fabricantes sentiram a necessidade de baixar os preços dos painéis, ajustando o mercado, tal como se concluiria no trabalho [26] referido anteriormente.

Devido à atual situação do país, é natural que o esforço para implementar benefícios fiscais à utilização de energias renováveis seja menor, o que se tem verificado com as atualizações constantes da legislação aplicada à microprodução. Esta redução de incentivos inibe o implemento destas tecnologias, pois deixam de ser rentáveis a curto prazo. No entanto, a indústria tende a adaptar-se e cada vez se produz painéis fotovoltaicos com menores custos e maiores eficiências.

Conforme é indicado no Regulamento Delegado nº244/2012 [6], os Estados-Membros devem apresentar à Comissão um relatório com todos os dados e pressupostos utilizados nos cálculos, bem como os seus resultados. Áustria, Alemanha e Polónia foram os primeiros

países a publicar os seus estudos resultantes da aplicação da metodologia de cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético [23].

Na Áustria, a análise de sensibilidade do ótimo de rentabilidade para edifícios multifamiliares identificou uma lacuna entre os níveis atuais e os níveis ótimos de rentabilidade de desempenho energético de 10.5% a 14.5% de acordo com diferentes pressupostos e considerando aquecimento urbano que é comumente utilizado neste país. Porém, para pacotes de medidas com outros tipos de sistemas de aquecimento (biomassa, ventilação, sistemas solares...) a diferença entre os níveis atuais e os verificados no custo ótimo aumenta para 15.4% a 21.6%.

O cálculo do custo ótimo realizado na Alemanha revela que do ponto de vista financeiro, o valor ótimo de energia primária para edifícios multifamiliares novos é de 53kWh/(m².ano). Os requisitos mínimos de desempenho energético atualmente em vigor poderiam ser apertados em cerca de 15% para alcançar os níveis ótimos de rentabilidade. Os cálculos provaram também, que taxas de desconto mais baixas e uma maior evolução dos preços de energia levam à diminuição dos valores ótimos de energia primária, ou seja, a diferença entre as exigências atuais e os níveis ótimos torna-se ainda mais notória.

Os cálculos desenvolvidos na Polónia revelaram uma grande diferença entre os requisitos atuais e os alcançados pela metodologia. Além disso, os cálculos para diferentes localizações na Polónia revelaram uma forte influência da localização sobre o consumo de energia primária. Já no cálculo do custo-ótimo não foi detetada a influência da localização. Estas observações podem tornar-se relevantes durante o processo de estabelecimento de novos requisitos mínimos relacionados com a eficiência energética dos edifícios.

Nos três países citados anteriormente verificou-se que os cálculos financeiros e macroeconómicos levam aos mesmos pontos ótimos de rentabilidade. Devido à flexibilidade de seleção de certos fatores, como por exemplo, o edifício de referência, as variantes selecionadas, as taxas de desconto, a evolução do preço de energia, etc. um grande número de níveis ótimos de rentabilidade podem ocorrer. Este parece ser o grande desafio na implementação da metodologia de custo ótimo [23].

O Quadro 2.7 demonstra as principais recomendações a considerar no processo de implementação da metodologia de acordo com os estudos visados anteriormente [23].

Quadro 2.7 – Síntese de recomendações relativas à metodologia de custo ótimo

Edifício de referência	<ul style="list-style-type: none"> • Deve ser representativo do parque edificado existente e dos novos edifícios em cada país; • Com geometrias simples; • Reproduzível na prática;
Seleção de pacotes de medidas	<ul style="list-style-type: none"> • Têm de ser calculados pelo menos 10 pacotes de medidas, que vai de encontro com a regulamentação atual; • Devem ser baseadas em padrões nacionais e amplamente aceites; • Devem ser considerados pacotes de medidas muito ambiciosos para fornecer uma estimativa das implicações financeiras e ambientais dos requisitos NZEB;
Metodologia	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo baseado em energia primária; • Incluir o uso de energia para: aquecimento, arrefecimento, ventilação, água quente e serviços auxiliares residenciais e não residenciais; • Comparação de pacotes de medidas com todos os requisitos de construção do país; • Harmonizadas com as normas europeias; • Fatores de conversão devem ser atualizados periodicamente;
Custo de matérias, instalações e equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de informações precisas de custos nos Estados-Membros; • Dados escassos e não coletados de forma consistente; • Bancos de dados devem ser desenvolvidos;
Taxas de desconto e evolução do preço da energia	<ul style="list-style-type: none"> • As taxas de desconto devem refletir os custos reais do capital de hipotecas a longo prazo, ou o retorno mínimo esperado sobre o investimento em caso de autofinanciamento; • A taxa de desconto deve ser ainda menor do que as hipotecas de longo prazo, a fim de refletir a rentabilidade do investimento em medidas de poupança de energia no momento iminente da reabilitação; • A evolução dos preços de energia, bem como as taxas de desconto influenciam o cálculo dos custos globais e podem alterar o ponto ótimo de rentabilidade;
Custo ótimo	<ul style="list-style-type: none"> • Ferramenta útil para estimar lacunas financeiras, energéticas e ambientais entre os níveis ótimos de rentabilidade e NZEB; • Auxilia a implementação de políticas adequadas, no sentido de preencher essas lacunas.

Na próxima secção explana-se a metodologia empregue no presente trabalho, de modo a elucidar de forma concisa e estruturada todas as etapas necessárias para atingir os objetivos propostos.

3 METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DE RENTABILIDADE ECONÓMICA

3.1 Introdução

A fim de definir o ponto ótimo de rentabilidade das medidas a aplicar, os Estados-Membros devem utilizar a metodologia estabelecida pela Comissão Europeia, o Regulamento Delegado nº 244/2012 [6]. Este documento estabelece o quadro metodológico comparativo a utilizar pelos Estados-Membros, com o objetivo de definir os níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético. Esta metodologia é facilmente resumida na Figura 3.1, adaptada de [23], onde de um modo esquemático se observa a estrutura e principais parâmetros do método de cálculo.

A metodologia combina regras de cálculo uniformes com os dados nacionais de modo a garantir um justo tratamento entre Estados-Membros. A definição de edifícios de referência e dos pacotes de medidas de eficiência são parte crucial do processo, tais etapas contribuem diretamente sobre a avaliação e sobre a possibilidade de encontrar as verdadeiras soluções ótimas de rentabilidade.

O quadro metodológico prevê o cálculo de níveis ótimos de rentabilidade nas perspetivas financeira e macroeconómica, deixando aos Estados-Membros o encargo de determinar qual destes modelos de cálculo produzirá o padrão de referência nacional relativamente ao qual serão avaliados os requisitos mínimos de desempenho energético nacionais [6].

O regulamento vem harmonizar as regras de cálculo do estudo de rentabilidade económica. Assim sendo, para efeitos de cálculo, deve-se definir com clareza os parâmetros a considerar, como: o período de cálculo, custos de energia e sua evolução nesse período, a taxa de desconto a utilizar; custos de manutenção; custos de exploração e de mão-de-obra; o ciclo de vida dos equipamentos; e os fatores de conversão de energia primária.

Em suma, a metodologia de rentabilidade ótima consiste em encontrar o custo mínimo em função da energia primária. É de salientar, que o ponto que corresponde ao custo ideal é um

mínimo de custo e não um mínimo de energia, logo outras soluções podem caracterizar-se por valores mais baixos de energia [30].

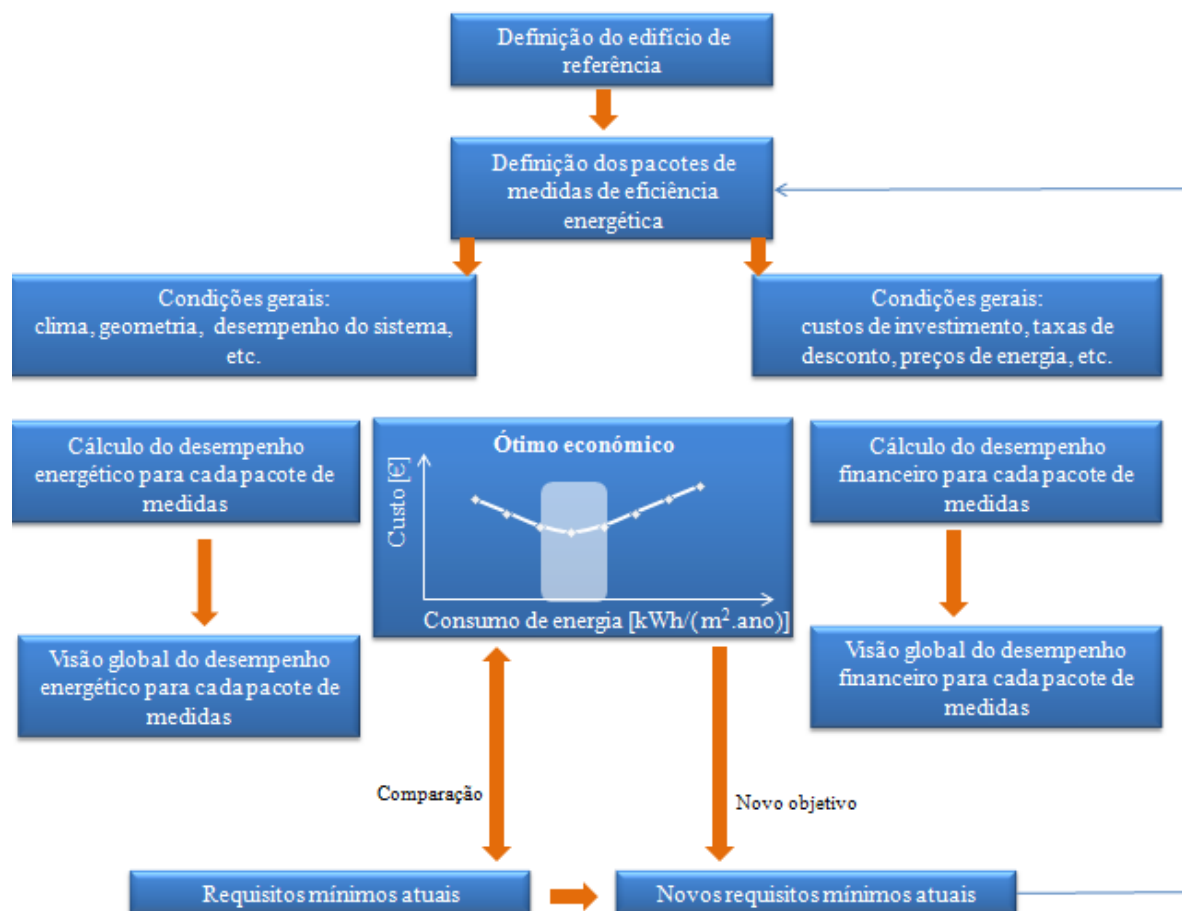


Figura 3.1 – Fases de implementação da metodologia de custo-ótimo

3.2 Definição do edifício de referência

O edifício de referência destina-se a representar o parque imobiliário típico existente em determinado Estado-Membro, uma vez que é impossível calcular a situação ótima em termos de rentabilidade para cada um dos edifícios. Assim, os edifícios de referência estabelecidos devem refletir da forma mais precisa possível o parque imobiliário nacional existente, para que os resultados dos cálculos realizados de acordo com a metodologia sejam representativos.

Os edifícios de referência devem ser caracterizados em: edifícios unifamiliares; blocos de apartamentos e edifícios multifamiliares; escritórios; e outras categorias que constam no

anexo I, ponto 5, alíneas d) a i), da Diretiva 2010/31/EU [1], para os quais existem requisitos de desempenho energético específicos.

É recomendado que os edifícios de referência sejam estabelecidos de uma das seguintes formas [31]:

- Seleção de um exemplo real que represente o edifício mais típico de uma determinada categoria específica (tipo de utilização com o padrão de ocupação de referência, área construída, densidade do edifício expressa como área envolvente/fator de volume, estrutura da envolvente do edifício com o valor U correspondente, sistemas de serviços técnicos e vetores energéticos, juntamente com a respetiva quota de utilização da energia).
- Criação de um «edifício virtual» que, em relação a cada parâmetro relevante, inclua os materiais e sistemas mais utilizados.

A escolha entre estas opções deve ser efetuada com base na consulta de peritos, na disponibilidade de dados estatísticos, etc. O modelo de notificação sugerido para comunicação à Comissão dos parâmetros de definição do edifício de referência encontra-se no Anexo III do Regulamento Delegado n°244/2012 [6], que sugere:

- Descrever os edifícios de referência para todas as categorias de edifícios e os motivos pelos quais são representativos do parque imobiliário, utilizando para o caso de edifícios existentes o Quadro 1 do presente anexo.
- Apresentar a definição de área de pavimento de referência utilizada no Estado-Membro e a respetiva forma de cálculo.
- Enumerar os critérios de seleção utilizados para definir cada edifício de referência, novo e existente (por exemplo, análise estatística baseada na utilização, na idade, na geometria, na zona climática, na estrutura de custos, nos materiais de construção, etc.), ponderando também as condições climáticas no interior e no exterior, bem como a localização geográfica.
- Indicar se o edifício de referência é por exemplo, um edifício virtual.
- Indicar o conjunto de dados subjacente para o parque imobiliário nacional.

Para edifícios existentes, os edifícios de referência devem ser definidos com base nas características dos edifícios existentes em determinado país ou região. Devido à dificuldade de obter estatísticas sobre o material de construção e outros aspetos das habitações, a escolha do edifício padrão pode gerar algumas inconsistências na comparação de custo-ótimo e portanto, torna-se importante minimizar erros realizando uma seleção mais adequada possível.

A definição do edifício de referência, além de representar o edifício-tipo afetado pela regulamentação, serve também para identificar setores que seriam prejudicados por requisitos que podem, contudo, constituir um ótimo de rentabilidade [23]. A seleção criteriosa de um edifício de referência constitui um requisito-chave para que se obtenham resultados o mais realistas possíveis no cálculo do custo-ótimo.

3.3 Definição das medidas de eficiência energética

Após a definição do edifício de referência, procede-se à definição das medidas/conjunto de medidas a estudar. As medidas a aplicar na reabilitação do imóvel atuam diretamente sobre o sistema, o que influencia o desempenho energético do mesmo. É recomendado, portanto, que as medidas sejam combinadas em pacotes de medidas, uma vez que as combinações significativas de medidas podem criar efeitos simultâneos conducentes a resultados melhores (no que respeita aos custos e ao desempenho energético) do que os das medidas isoladas [31]. Logo, pretende-se selecionar pacotes de medidas que direcionem o edifício para um bom desempenho energético do edifício.

Estas medidas de melhoria da eficiência energética devem então traduzir-se em economias de energia que possam ser claramente verificadas e medidas. Em seguida expõe-se uma lista exemplificativa de possíveis medidas de promoção da eficiência energética a considerar no setor residencial, segundo o Anexo III da Diretiva 2006/32/CE [32]:

- a) Instalação de sistemas de aquecimento e arrefecimento com alto rendimento;
- b) Aplicação de isolamento e ventilação (por exemplo, isolamento de telhados e de paredes, instalação de janelas com vidros duplos/triplos, aquecimento e arrefecimento passivos);
- c) Gestão eficiente do uso de águas quentes (por exemplo, instalação de novos dispositivos, utilização direta e eficiente no aquecimento de espaços, máquinas de lavar);
- d) Instalação de lâmpadas eficientes, balastos de alto rendimento e sistemas de comando digitais;
- e) Instalação de novos dispositivos mais eficientes na cozinha e refrigeração (por exemplo, sistemas de recuperação de calor);
- f) Aquisição de outros equipamentos e aparelhos (por exemplo, equipamentos de cogeração, temporizadores para uma utilização otimizada da energia, sistemas redutores de perdas em modo de vigília, instalação de condensadores para reduzir a energia reativa, transformadores de perdas reduzidas);
- g) Produção doméstica de energia a partir de fontes de energia renováveis (por exemplo, aplicações térmicas da energia solar, água quente para uso doméstico, aquecimento e arrefecimento de espaços com recurso à energia solar, etc.).

Deve-se realçar que objetivo da metodologia de determinação dos níveis ótimos de rentabilidade é garantir uma concorrência leal entre as diferentes tecnologias, não se limitando ao cálculo do custo global dos pacotes/variantes já estabelecidos e comprovados. Num pacote de medidas, as medidas de eficiência rentáveis podem permitir a inclusão de outras medidas que ainda não são rentáveis, mas que podem contribuir substancialmente para a redução do consumo de energia primária e para a redução de CO₂ associada ao conceito de edifício total, desde que o pacote global continue a proporcionar benefícios superiores aos custos durante o tempo de vida do edifício [31].

A Comissão Europeia revela que o número calculado e aplicado a cada edifício de referência não deverá ser inferior a 10 pacotes/variantes mais o caso de referência. Normalmente, as soluções mais representativas da realidade do país, serão consideradas como medidas a implementar, adaptando o estudo ao que realmente se verifica na realidade [31]. Neste trabalho, apenas serão abordadas medidas no que respeita a vãos envidraçados, isolamento de paredes exteriores e cobertura, sistemas de aquecimento, arrefecimento e AQS, bem como sistemas de energias renováveis. A combinação destas medidas irá constituir um conjunto de pacotes de medidas para posterior análise de rentabilidade económica. De notar que equipamentos de cozinha, iluminação, entre outros, não serão alvo do presente estudo.

Esclarece-se ainda que o caso referência retrata a situação base em que o edifício se encontra antes da reabilitação, sendo que todas as possíveis soluções devem garantir as mesmas condições de conforto e de qualidade do ar interior, só assim se pode efetuar uma comparação justa entre os pacotes de medidas.

Contudo é importante salientar que as variantes seleccionadas não devem ser consideradas, de forma inquestionável, como as únicas soluções de rentabilidade otimizada, mesmo que se tenham mostrado eficientes em termos de custo ao longo do período de cálculo.

3.4 Cálculo das necessidades de energia primária

O desempenho energético do edifício de referência deve ser calculado em consonância com o quadro geral comum previsto no anexo I da Diretiva 2010/31/EU [1]. O Regulamento nº244 [6] indica que cada Estado-Membro deve determinar o desempenho energético das medidas/conjuntos de medidas através do cálculo, relativamente à área de pavimento definida a nível nacional, das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento. De notar que para efeitos do cálculo de otimização da rentabilidade, os resultados do desempenho energético devem ser expressos em metros quadrados de área útil de pavimento do edifício e referir-se ao consumo de energia primária.

Assim, as necessidades nominais de energia primária de um edifício de habitação resultam da seguinte expressão [33]:

$$\begin{aligned}
 N_{tc} = & \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{i,k} \times N_{ic}}{\eta_k} \right) \times F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{v,k} \times \delta \times N_{vc}}{\eta_k} \right) \times F_{pu,j} \\
 & + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{a,k} \times Q_a/A_p}{\eta_k} \right) \times F_{pu,j} + \sum_j \frac{W_{vm,j}}{A_p} \times F_{pu,j} - \sum_p \frac{E_{ren,p}}{A_p} \\
 & \times F_{pu,p}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Em que:

N_{ic}	Necessidades de energia útil para aquecimento, supridas pelo sistema k [kWh/(m ² .ano)]
$f_{i,k}$	Fração das necessidades de energia útil para aquecimento supridas pelo sistema k
N_{vc}	Necessidades de energia útil para arrefecimento, supridas pelo sistema k [kWh/(m ² .ano)]
$f_{v,k}$	Fração 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/(m ² .ano)]
$f_{a,k}$	Fração das necessidades de energia útil para produção de AQS supridas pelo sistema k
η_k	Eficiência do sistema k
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 , [kWh/ano]
$W_{vm,j}$	Energia elétrica necessária ao funcionamento dos ventiladores, [kWh/ano]
A_p	Área útil de pavimento [m ²]
δ	Igual a 1, exceto para o uso de arrefecimento N_{vc} que pode tomar o valor 0
$F_{pu,j}, F_{pu,p}$	Fator de conversão de energia útil para energia primária, [kWh _{EP} /kWh]

A energia primária corresponde à energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis que ainda não passou por um processo de conversão ou de transformação. Os Estados-Membros devem então calcular as necessidades de energia primária por recurso aos fatores de conversão de energia primária estabelecidos a nível nacional [6].

No que respeita ao cálculo do valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia primária (N_t) admite-se a inexistência de consumos de energia associados à ventilação mecânica e de sistemas de aproveitamento de energias renováveis. Considera-se os valores e condições de referência para os principais parâmetros, em substituição das soluções previstas ou instaladas no edifício, sendo calculado pela seguinte expressão [34]:

$$N_t = \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{i,k} \times N_i}{\eta_{ref,k}} \right) \times F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{v,k} \times N_{vc}}{\eta_{ref,k}} \right) \times F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{a,k} \times Q_a / A_p}{\eta_{ref,k}} \right) \quad (2)$$

Em que:

N_i	Valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento [kWh/(m ² .ano)]
$f_{i,k}$	Fração 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/(m ² .ano)]
$f_{v,k}$	Fração 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/(m ² .ano)]
$f_{a,k}$	Fração 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 ambiente, arrefecimento ambiente e preparação de AQS
j	Fonte de energia
A_p	Área útil de pavimento [m ²]
$F_{pu,j}$	Fator de conversão para energia primária de acordo com a fonte de energia do tipo de sistemas de referência utilizado, [kWh _{EP} /kWh]

A metodologia para o cálculo do desempenho energético de edifícios atualmente em vigor é o RCCTE. No entanto, este regulamento encontra-se em fase de reformulação. Neste estudo será possível utilizar as metodologias propostas na reformulação e que estiveram em período de consulta pública.

A ferramenta utilizada para esse efeito foi disponibilizada pelo Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção – ITeCons. Este instrumento, em formato Microsoft Excel[®] [35], retrata a aplicação exata do RCCTE no edifício referência abordado neste trabalho. Nos campos de entrada do *software* podemos colocar todos os parâmetros relativos ao edifício tais como, os aspetos técnicos das paredes exteriores, envidraçados, coeficientes de transmissão térmica, tipos de sistemas de aquecimento e arrefecimento, rendimentos dos aparelhos, etc. É também possível selecionar a localização do edifício, de modo a utilizar os dados climáticos do local, que é um fator determinante no desempenho térmico de edifícios. Esta ferramenta permite também comparar os valores obtidos com os valores de referência da legislação nacional. Tal descrição pormenorizada de todo o edifício torna-se essencial para, através da metodologia indicada no RCCTE, calcular as necessidades energéticas de aquecimento, de arrefecimento e de preparação de AQS.

3.5 Cálculo do custo global

Identificado o edifício de referência a estudar, os pacotes de medidas a aplicar e as respetivas necessidades energéticas decorrentes de cada pacote, procede-se ao cálculo do custo global.

Para o cálculo da rentabilidade ótima, o cálculo do custo global deve ter em consideração os custos iniciais de investimento, os custos de manutenção e de substituição dos componentes do edifício, os custos de energia, os valores residuais dos materiais e, se pertinente, os custos de eliminação. Segundo o regulamento em questão, este cálculo deve ser expresso em valor atualizado líquido e os Estados-Membros devem utilizar um período de cálculo de 30 anos para os edifícios residenciais. Os Estados-Membros são ainda incentivados a utilizar o anexo A da norma EN 15459 [6], relativa aos parâmetros económicos dos componentes de edifícios, para a definição dos ciclos de vida económicos estimados dos componentes de edifícios em causa. No que diz respeito aos custos de energia, o Regulamento n.º 244/2012 [6] através do Anexo II, fornece indicações pertinentes da evolução dos custos de energia até 2030, contudo, os países devem elaborar previsões nacionais da evolução dos preços de energia.

Um parâmetro essencial em estudos de rentabilidade económica é a taxa de desconto. A taxa de desconto não é nada mais do que o inverso da taxa de juro. Por outras palavras, a taxa de desconto procura transportar para valores atuais os valores que irão ser pagos (ou recebidos) no futuro. Considera-se para o efeito uma taxa de desconto real, isto é, excluindo a inflação. O guia do Regulamento n.º 244 [31] sugere aos Estados-Membros que para determinar a taxa de desconto a utilizar nos cálculos macroeconómicos e financeiro, se deve proceder a uma análise de sensibilidade de, pelo menos, duas taxas de desconto para cada cálculo. O Regulamento Delegado n.º 244/2012 [6] sugere a utilização de 3% para uma dessas mesmas

taxas de desconto. Uma taxa de desconto mais elevada reflete uma abordagem puramente comercial, de curto prazo, de avaliação de investimentos, enquadrando-se mais no cálculo financeiro. Enquanto uma taxa mais baixa (2% a 4%) reflete o benefício decorrente dos investimentos em eficiência energética para os ocupantes do edifício ao longo de todo o ciclo de vida do investimento. A taxa de desconto variará consoante o Estado-Membro, visto refletir, em certa medida, não só as prioridades políticas (para o cálculo macroeconómico), mas também diferentes contextos financeiros e diferentes condições em matéria de crédito hipotecário [31].

A Comissão Europeia elegeu uma entidade privada, a Ecofys [36], empresa especialista em economia de energia, soluções de energia sustentável e políticas climáticas, para desenvolver uma ferramenta de cálculo com base no Regulamento Delegado nº244/2012 [6]. A Ecofys desenvolveu então uma ferramenta de cálculo em formato Microsoft Excel®, que possibilita a introdução de dados do edifício em causa, as taxas de desconto, os custos de energia associados, as necessidades energéticas, as taxas aplicáveis e os custos de investimento e manutenção das medidas a aplicar. Permite assim, obter como dado de saída, uma curva de custo ótimo dos vários pacotes de medidas em estudo. A referida curva não é mais do que um gráfico, constituído por vários pontos (para os vários pacotes de medidas), que são função do custo das medidas ao longo do período de cálculo e das necessidades energéticas do edifício, expressas em kWh/(m².ano), como é ilustrado no exemplo presente na Figura 3.2, em que cada ponto representa um pacote de medidas.

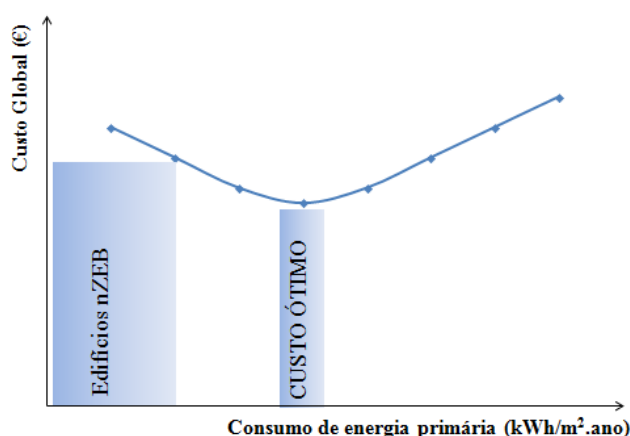


Figura 3.2 – Exemplo de curva de custo ótimo

Esta ferramenta serve como base de cálculo para o presente trabalho, é bastante simples e intuitiva, mas necessita de muita atenção e critério no seu manuseamento, tais como: nas escolhas de taxas de desconto; elaboração precisa de custos de investimento e manutenção;

noção da evolução dos custos da energia; incremento de energias renováveis, entre muitos outros aspetos.

Obtido o pacote de medidas que indica o nível ótimo de rentabilidade, deve ser realizada a comparação dos resultados do custo ótimo com os requisitos mínimos de desempenho energético atualmente em vigor. Assim sendo, verifica-se uma discrepância significativa entre o resultado do cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade e os requisitos mínimos de desempenho em vigor num Estado-Membro, caso estes últimos estejam 15% abaixo dos níveis ótimos [31].

Neste subcapítulo, resta apenas evidenciar a diferença entre uma análise numa perspetiva financeira e uma análise numa perspetiva macroeconómica. Como foi referido na secção 3.1, a metodologia da definição de rentabilidade económica estabelece que sejam realizados os cálculos do custo ótimo nestas duas vertentes.

3.5.1 Cálculo do modelo financeiro

A análise financeira representa uma análise na ótica do possível consumidor. Por outras palavras, traduz os custos que o cidadão comum irá ter de considerar quando pretende realizar o investimento. Esta perspetiva engloba os preços pagos pelo cliente, incluindo os impostos aplicáveis, nomeadamente o IVA.. Este ponto de vista torna-se especialmente útil para o cidadão que procura investir na reabilitação energética do seu imóvel. Este deve estar absolutamente convencido de que o investimento, em determinado pacote de medidas de reabilitação, será mais rentável do que investir noutro projeto, ou do que colocar o seu capital na banca.

Os custos globais devem ser calculados 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, por recurso à fórmula [6]:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,r}(j) \right] \quad (3)$$

Em que:

τ O período de cálculo;

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

- C_I Custo 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 ;
 $V_{f,r}(j)$ 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 para o ano i , com base na taxa de desconto r , a calcular do seguinte modo:

$$R_d(p) = \left(\frac{1}{1 + r/100} \right)^p \quad (4)$$

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

3.5.2 Cálculo do modelo macroeconómico

A análise macroeconómica é direcionada para uma perspetiva governamental, onde os aspetos sociais devem ser tidos em consideração. Esta análise não inclui os impostos, como o IVA, mas terá em conta o aspeto negativo das emissões de GEE. Por isso representa uma análise económica de um ponto de vista mais amplo, que procura ilustrar e definir possíveis estratégias do governo para fomentar o aumento da eficiência energética nos edifícios existentes.

Dado que se introduziu uma nova categoria de custos, os custos das emissões GEE, a metodologia de cálculo dos custos é expressa pela seguinte expressão [6]:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,r}(j) \right] \quad (5)$$

Em que:

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

É necessário, então, calcular o custo acumulado do carbono dos conjuntos de medidas definidas para o período de cálculo. Para tal, multiplica-se a soma das emissões anuais de GEE pelos preços previstos, por tonelada de CO₂-equivalente, das licenças de emissão de GEE emitidas em 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 (RCLE) atualmente previstos pela Comissão [6].

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

4.1 Definição do edifício de referência

O edifício de referência pode constituir um exemplo real, que representa um edifício típico de determinada categoria, ou um edifício virtual, que inclui uma estimativa dos materiais e sistemas mais comuns no parque habitacional.

Neste caso estudo, o edifício selecionado constitui um edifício virtual, cujas características foram definidas com dados recolhidos pela Agência para a Energia (ADENE) e pelo Instituto Nacional de Estatística (INE). A ADENE com base em 500 mil certificados energéticos do parque habitacional português e o INE com a realização de inquéritos aos residentes [37], facultaram uma base bastante abrangente de dados, no sentido de apurar as características mais comuns dos edifícios em Portugal. A amostra obtida foi dividida e catalogada de acordo com a data de construção dos edifícios, resultando na seguinte divisão: anteriores a 1960; de 1961 a 1990; de 1991 a 2012; e novos.

Com estes dados estatísticos foi estimado uma média das inúmeras características das construções e hábitos de utilização, de modo a obter um edifício referência multifamiliar anterior a 1960, que represente o padrão mais comum verificado no parque habitacional existente em Portugal.

Numa primeira análise, a cidade de Coimbra foi a localização escolhida para o edifício, remetendo assim o uso de dados climáticos referentes a esta zona do país, classificada como zona climática $I_1 - V_2$, de acordo com o RCCTE. Foi considerado também que o edifício se encontra a 100m de altitude, sem grandes obstáculos na envolvente, garantindo desta forma, condições de insulação ótimas e evitando dificuldades acrescidas na obra de reabilitação. No Quadro 4.1 resume-se as principais características do edifício referência considerado nos cálculos.

Quadro 4.1 – Características do edifício de referência localizado em Coimbra

Características do edifício	Multifamiliar
Tipologia	T2
Área útil de pavimento	65m ²
Pé direito	2.80m
Fachada orientada a Sul	A=19.32m ² ; U=2.00W/(m ² .°C);
Fachada orientada a Norte	A=19.32m ² ; U=2.00W/(m ² .°C);
Fachada orientada a Oeste	A=19.32m ² ; U=2.00W/(m ² .°C);
Vãos envidraçados exteriores por fachada	A=3.25m ² ; U=5.10W/(m ² .°C);
Cobertura sob o desvão	A _{interior} =65m ² U _{ascendente} =2.80W/(m ² .°C); U _{descendente} =2.00W/(m ² .°C)
Pavimento	Em contacto com espaço aquecido
N_{tc}	306kWh/(m ² .ano)

De referir que o edifício em causa dispõe de rede de abastecimento de combustível líquido e gasoso, e não possui isolamento nas tubagens de distribuição de AQS, o que afeta o rendimento dos equipamentos para o efeito.

Este edifício de referência possui equipamentos para suprir as necessidades de preparação de AQS e de aquecimento, são eles o esquentador a gás e uma resistência elétrica, respetivamente. A idade considerada para estes sistemas foi de 17 anos, representando assim uma eficiência corrigida de apenas 60% para o esquentador e de 90% para a resistência elétrica [35]. Tendo estes equipamentos um ciclo de vida esperado de 20 anos significa que no cálculo, ao fim do 3º ano do período de cálculo, estes são substituídos por novos equipamentos com melhores eficiências. No sentido de se realizar uma comparação mais equitativa em termos de necessidades energéticas dos pacotes de medidas de reabilitação energética, assume-se a eficiência de um aparelho de ar condicionado para o cálculo das N_{vc} do edifício referência.

4.2 Medidas de eficiência energética estudadas

As medidas de melhoria de eficiência energética a implementar no edifício contemplam a intervenção no isolamento térmico da envolvente, nos envidraçados, a substituição dos equipamentos existentes por outros mais eficientes e a introdução de equipamentos de energia renovável.

De seguida, esclarece-se com mais pormenor as medidas de reabilitação energética a implementar no edifício de referência. Posteriormente, estas medidas individuais irão integrar pacotes de medida para implementar no edifício referência.

4.2.1 Isolamento da envolvente

A colocação de material isolante na envolvente é uma medida que influencia fortemente os requisitos energéticos de aquecimento e de arrefecimento do edifício. A eficiência energética depende do coeficiente de condutibilidade térmica do material, sendo que quanto menor o coeficiente, mais eficiente se torna na redução de perdas para o exterior. Para este apartamento, dado que se encontra no último andar, apenas foi considerado a aplicação de isolamento pelo interior das paredes em contacto com espaço exterior e na cobertura sob a laje. A colocação de isolamento no piso torna-se desnecessária, pois o pavimento encontra-se em contacto com outro espaço aquecido.

Uma análise mais detalhada dos vários tipos de isolamentos, tais como aglomerado de cortiça expandida (ICB), poliestireno expandido moldado (EPS), lã mineral (MW), poliestireno extrudido (XPS), etc., encontra-se em [38], cujo estudo engloba a avaliação da rentabilidade económica dos vários tipos e espessuras de materiais isolantes para o edifício de referência considerado. Como se verificou neste estudo, isolamentos como EPS e MW obtiveram um excelente desempenho ao nível de redução de custos globais.

Como tal, no presente estudo, as medidas seleccionadas englobam isolamentos de EPS, MW e XPS, cujas espessuras encontram-se entre os 30mm e 140mm. O isolamento térmico é realizado pelo interior do edifício sendo coberto por uma camada de reboco. De referir que o ciclo de vida do material considerado foi de 30 anos.

4.2.2 Vãos envidraçados

As componentes envidraçadas da fachada são elementos com elevada transmitância, sendo responsáveis por 10% a 25% das trocas de calor involuntárias com o exterior e a principal forma de entrada de radiação solar no edifício. Como tal, torna-se relevante incluir esta medida de reabilitação energética, no sentido de melhorar a eficiência destes.

As características térmicas das janelas foram obtidas em [38], estudo este que procurou analisar a rentabilidade económica de diferentes soluções de envidraçados. Tais soluções prendem-se com caixilhos em madeira, PVC e alumínio, e vários tipos de vidros duplos com

coeficientes de transmissão térmica e fatores solares distintos. Neste estudo, os envidraçados com caixilho em PVC e vidros duplos (6/20/4mm) evidenciaram-se como os mais viáveis, sendo que será este o principal tipo de janela considerado no presente trabalho. O ciclo de vida estimado para as janelas foi de 30 anos.

Portanto as medidas de eficiência energética respeitantes à substituição de envidraçados são:

- PVC_U2: Caixilho em PVC com vidro duplo de fator solar de 0.85 com um $U=2W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- PVC_U1.7: Caixilho em PVC com vidro duplo (vidro planitherm/ar/incolor) de fator solar 0.51 com um $U=1.7W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- PVC_U2.61: Caixilho em PVC com vidro duplo (vidro incolor/ar/incolor) de fator solar 0.78 com um $U=2.6W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- PVC_U2.57: Caixilho em PVC com vidro duplo (vidro stopsol/ar/clear) de fator solar 0.45 com um $U=2.6W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- PVC_U1.4: Caixilho em PVC com vidro duplo (planitherm/árgon/incolor) de fator solar 0.50 com um $U=1.4W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

4.2.3 Equipamentos

Os equipamentos necessários para preparação de AQS, aquecimento e arrefecimento são o constituinte mais impactante no que diz respeito aos consumos energéticos dos edifícios, são eles que exercem mais influência no custo ótimo da solução. Sobre eles deve recair especial atenção aquando da definição do pacote de medidas a implementar na reabilitação do edifício.

Para suprir as necessidades de aquecimento, arrefecimento e AQS calculadas através da metodologia proposta no RCCTE, optou-se por considerar alguns equipamentos comumente utilizados no mercado do setor. Em seguida, será exposta uma breve descrição do funcionamento de cada equipamento considerado nas medidas a implementar.

- Bomba de calor

O princípio de funcionamento de uma bomba de calor assenta no princípio de Carnot. Este ciclo consiste em submeter 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 [39]. Basicamente, a ideia é transferir o calor de um local para outro. Na realidade, é exatamente o mesmo princípio presente em aparelhos tão comuns como, o vulgar 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, sendo apenas necessário pagar o custo energético deste transporte [40]. Numa bomba de calor estão presentes os seguintes componentes:

1. Um evaporador onde a energia absorvida é transferida para o fluido refrigerante que aquece e se evapora;
2. Um compressor que faz com que este fluido circule em circuito fechado, aspirando-o e comprimindo-o fazendo com que a sua pressão e temperatura aumentem;
3. Um condensador onde o calor é transferido e o fluido refrigerante ao arrefecer, liquefaz-se;
4. Por fim, uma válvula de expansão que permite a diminuição da pressão do fluido refrigerante e consequente arrefecimento passando a vapor húmido que volta a entrar no evaporador.

A bomba de calor constitui um equipamento interessante pois supre as necessidades de aquecimento, de arrefecimento e de AQS, sempre com altas eficiências de trabalho. A bomba de calor considerada possui um COP de 3.33, um EER de 2.68, uma Pu de 8kW e 20 anos de ciclo de vida estimados. Acoplado ao equipamento é necessário a aquisição de ventiladores para distribuir o calor/frio pelas repartições da habitação, como tal foi considerado o custo de 3 ventiladores no orçamento.

- Sistema de ar condicionado

O sistema de ar condicionado tem um funcionamento semelhante ao da bomba de calor. Para efeitos de cálculo selecionou-se um sistema *muli-split* “ar-ar”, que é constituído por um aparelho externo e por 3 dispositivos internos que irão distribuir o ar pelo edifício. O sistema de ar condicionado, realiza então aquecimento e arrefecimento, possui COP de 4.10, um EER de 3.50 uma Pu de 10kW e durabilidade estimada de 20 anos.

- Caldeira a gás

O funcionamento de uma caldeira a gás é bastante simples, consiste em queimar o gás natural sendo o calor gerado pela combustão fornecido à água que circula no interior da caldeira. Esta água aquecida é acumulada e posteriormente distribuída pelos radiadores que se encontram distribuídos pela casa.

A caldeira a gás considerada foi uma caldeira mista, ou seja, possibilita a produção de AQS por acumulação, que ao ter um depósito de água quente pode suprir as necessidades de aquecimento e AQS. Para o efeito de distribuição de calor foram acoplados 3 radiadores. A

caldeira em estudo possui um rendimento de 93%, uma Pu de 24.6kW e um ciclo de vida de 20 anos.

- Emissor térmico

Os emissores térmicos são dispositivos de fácil utilização e instalação, não necessitam de obras para sua colocação, ocupa pouca área útil e portanto, tornam-se uma opção prática para aquecimento da habitação. Estes aparelhos apenas necessitam de estar ligados à corrente elétrica para produzir calor. Os emissores térmicos utilizados têm 800W de potência e uma eficiência que se aproxima dos 100%. Considera-se para o efeito uma durabilidade de 20 anos.

- Esquentador a gás

O esquentador a gás possui um queimador, envolvido por uma serpentina onde circula a água que irá ser aquecida. Ao ser acionado, a chama é controlada automaticamente por um manómetro que possui um sensor na rede de água e uma válvula que controla a passagem do gás para o queimador.

Este equipamento é um dos aparelhos mais comuns para aquecimento de águas sanitárias, existindo também na solução base do edifício de referência. No entanto, esquentadores antigos devem ser substituídos por esquentadores mais eficientes, possibilitando assim obter uma maior economia no seu uso. O esquentador considerado nos pacotes de medidas tem o rendimento de 87%, uma Pu de 24.4kW e um ciclo de vida estimado de 20 anos.

- Caldeira elétrica

As caldeiras elétricas são equipamentos compostos por um vaso de pressão onde a água é aquecida por eléctrodos ou resistências. Embora existam caldeiras elétricas no mercado que possibilitam aproveitar a água quente para realizar aquecimento através de radiadores ou piso radiante, a caldeira considerada destina-se exclusivamente para produção de AQS, tem capacidade de 75l de armazenamento, um rendimento de 80%, potência de 2000W e ciclo de vida de 20 anos.

De notar que para efeitos de estudo não foram considerados os equipamentos de iluminação, de cozinha e de ventilação. Embora se tenha procurado considerar variados tipos de equipamentos, muitos outros poderiam ter sido ponderados mas, como o intuito do presente estudo não é, especificamente, realizar uma análise detalhada de todas as possíveis medidas a aplicar, considerou-se suficiente esta amostra. Outro possível fator de discrepância nos resultados prende-se com o dimensionamento dos equipamentos, pois os equipamentos foram

selecionados em função da dimensão da habitação em estudo, mas também dos orçamentos disponíveis. Como tal poderá haver alguns erros de dimensionamento de alguns equipamentos.

4.2.4 Energias renováveis

As fontes de energia renovável consideradas no presente trabalho foram a aplicação de painéis solares térmicos para produção de AQS, utilização de painel fotovoltaico para geração de eletricidade e utilização de biomassa, através de uma salamandra de combustão de *pellets*, para produção de calor. Em seguida expõe-se a descrição dos equipamentos, bem como a sua contribuição de energia anual.

- Solar térmico

A implementação de equipamentos solares para preparação de AQS é hoje uma obrigatoriedade nas novas construções e nas grandes reabilitações. Na reabilitação de edifícios, a sua instalação é uma das FER mais utilizadas em reabilitações imóveis. É praticamente possível instalar este tipo de sistemas em todas as habitações unifamiliares. No que respeita a edifícios multifamiliares, a implementação é também possível, mas deve ser dimensionada caso a caso.

O funcionamento de um sistema solar térmico é bastante simples: a superfície do painel solar transforma a luz solar nele incidente em calor aproveitável. Este calor é absorvido pelo líquido solar 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 então disponível num depósito acumulador. O material isolante deste impede o arrefecimento da água, sendo possível utilizar a água quente através da energia solar em períodos em que não existe sol, como por exemplo, durante a noite [41].

Para o edifício referência considerou-se um equipamento com sistema em termosifão (Figura 4.1), ou seja, um sistema compacto formado por um coletor solar, um depósito acumulador e todos os componentes necessários para dispor de AQS. Dado que estamos perante um edifício T2, considerou-se um modelo com depósito acumulador de 200l, perspetivando-se que satisfaça grande parte das necessidades de AQS do edifício. O modelo escolhido pertence a uma marca comercial, cujo orçamento foi fornecido numa loja da especialidade. Para efeitos de cálculo considera-se um ciclo de vida de 20 anos. O Quadro 4.2 revela as características técnicas do equipamento.



Figura 4.1 – Exemplo do painel solar térmico

Quadro 4.2 – Características técnicas do equipamento solar térmico

Dimensões exteriores coletor (mm)	1.753 × 1.147 × 87
Superfície de abertura (m²)	1.89
Superfície absorvente (m²)	1.88
Capacidade (litros)	1.4
Capacidade total do circuito primário (litros)	9.6
Dimensões depósito acumulador (mm)	500 × 1320
Volume depósito acumulador (litros)	200
Peso com suporte e sem água (kg)	115
Material acumulador	Aço esmaltado
Tipo de isolamento	Espuma de poliuretano de 50mm
Pressão máxima de trabalho (bar)	10

O contributo do equipamento foi estimado com recurso ao *software Solterm 5* [42], que possui na sua base de dados o modelo em causa. A produção anual estimada encontra-se no Quadro 4.3, em que se observa as diferenças de produção consoante a localização escolhida.

Quadro 4.3 – Contributo anual do solar térmico em kWh

Localização	Contributo anual [kWh]
Coimbra	1509
Porto	1409
Évora	1662
Bragança	1404

- Painel fotovoltaico

Nos sistemas fotovoltaicos, a radiação solar é convertida em energia elétrica por intermédio dos chamados semicondutores, as denominadas células fotovoltaicas. Os semicondutores feitos de silício são os mais usados na construção das células e o seu rendimento atual ronda os 25-30%. O agrupamento de módulos, colocados numa mesma estrutura de suporte, forma um painel. Quando incide luz solar com energia suficiente sobre estas estruturas, produz-se uma corrente de eletrões, obtendo-se assim energia elétrica [41]. Esta energia elétrica produzida pode ser armazenada em baterias para consumo da própria habitação, ou vendida à rede elétrica nacional.

Em termos de impactos ambientais, os painéis fotovoltaicos devolvem a energia empregue na sua construção em cerca de três anos, e emitem, relativamente a uma central térmica convencional, cerca de 20% menos CO₂ para a mesma quantidade de eletricidade produzida. Os impactos ambientais mais importantes ocorrem nas fases de produção, construção e desmantelamento dos sistemas. Na construção de células fotovoltaicas utilizam-se diversos materiais nocivos para o ambiente e saúde e é consumida uma quantidade apreciável de energia, a que está ligada a emissão de poluentes atmosféricos, nomeadamente de GEE [41]. O desmantelamento dos painéis fotovoltaicos pode representar um risco para o ambiente, devido à perigosidade dos materiais que os constituem, no entanto, dado que se trata de uma tecnologia ainda em fase de desenvolvimento, ainda não há dados concretos sobre os riscos provocados pelo desmantelamento dos painéis.

Dada a complexidade de escolha e dimensionamento deste tipo de equipamento, o presente estudo recorre a um trabalho existente [29], cujo um dos objetivos do estudo era dimensionar um sistema fotovoltaico. Deste modo a escolha do modelo de painéis solares e do inversor, bem como, os orçamentos utilizados são baseados neste trabalho.

O contributo anual do sistema fotovoltaico foi estimado através do *software Sunny Design* [43]. Procurou-se dimensionar um sistema que supra as necessidades energéticas consideradas no cálculo, tendo sido selecionado um sistema com 12 módulos fotovoltaicos e 1 inversor, ocupando uma área de cerca de 15m². Estimou-se que tal sistema produz cerca de 4000kWh por ano, Quadro 4.4, o que é suficiente para garantir as necessidades elétricas da habitação. A potência de pico obtida foi de 2.7kWp, respeitando deste modo a potência de pico máxima definida para a microprodução, 3.68kWp. Dado que o programa de simulação em causa não possui dados climáticos das zonas que se pretende explorar, foram introduzidos no *software* informações climáticas obtidas no *software EnergyPlus* [44].

De salientar que se consideram duas abordagens distintas realizadas para este tipo de equipamento. Uma abordagem prende-se com um sistema fotovoltaico com baterias para armazenar a energia que produz, satisfazendo deste modo, as necessidades elétricas da habitação. Numa outra abordagem, procura-se utilizar este tipo de equipamento para vender parte da energia que produz à rede. A venda de energia à rede considera as taxas de regime bonificado estabelecidas no Despacho DGEG de 3 de Janeiro de 2013 [45]. O custo da taxa de inscrição para obtenção do registo de microprodutor foi ignorado no cálculo e o ciclo de vida considerado para o sistema foi de 20 anos

Quadro 4.4 – Contributo anual dos painéis solares em kWh

Localização	Contributo anual [kWh]
Coimbra	3880
Porto	3963
Évora	4199
Bragança	4016

- Salamandra a *pellets*

A salamandra com funcionamento a *pellets* é um equipamento em fase de ascensão no mercado (Figura 4.2). Trata-se de um sistema relativamente fácil de instalar e pode ser colocada, por exemplo, em substituição de um radiador na sala.

Os *pellets* não são mais do que granulado proveniente da produção de madeira, geralmente produzidos a partir de serragem de madeira, que é refinada e seca e posteriormente comprimida. Os *pellets* são extremamente densos, o que permite serem consumidos com elevada eficiência calorífica. Sendo que o poder calorífico inferior deste tipo de combustível é variável, dependente do tipo de madeira e do seu processo de transformação, este ronda os 5 kWh/kg, valor considerado nos cálculos.

Os *pellets* de madeira são o combustível sólido mais limpo. Devido às caldeiras de combustão altamente eficientes desenvolvidas ao longo dos últimos anos, a emissão de compostos químicos, como óxidos de nitrogénio ou compostos orgânicos voláteis, é muito reduzida, o que torna os *pellets* uma das formas de aquecimento menos poluentes disponíveis atualmente no mercado [46].

O funcionamento deste equipamento é bastante simples, os *pellets* são colocados no depósito do equipamento que posteriormente são automaticamente introduzidos no queimador. A ignição é feita através de uma resistência elétrica. Esta torna-se incandescente e em conjunto

com a passagem de ar, permite um acendimento rápido e automático. Durante a combustão o calor é transferido para os permutadores de calor, que será distribuído para o ambiente através do ventilador. Os gases resultantes da combustão são libertados para o exterior, com o auxílio de um motor de extração e da respetiva tubagem que liga o aparelho ao exterior do edifício [47].

No presente estudo, este sistema foi colocado na sala do edifício de referência, acoplado com a aquisição de emissores elétricos para atender às necessidades de aquecimento nos restantes compartimentos. Esta opção prende-se com o facto de não ser cómodo, nem viável a opção de colocar uma salamandra em cada compartimento da habitação. Muitas outras opções de utilização de *pellets* estão, atualmente a ser comercializadas no mercado, nomeadamente para suprir também necessidades de AQS e uso de sistemas de ventilação para distribuir o calor por toda a habitação, no entanto, apenas este simples equipamento foi considerado. Esta opção pode contudo, ser questionável, já que utilizar este tipo de equipamento na reabilitação de um edifício multifamiliar pode acarretar alguns entraves adicionais. Isto é, a sua instalação requer aberturas na fachada para extração de fumos, tais aberturas podem originar pontes térmicas, se não forem devidamente salvaguardadas.



Figura 4.2 – Exemplo de salamandra a *pellets* considerada no estudo

Nos respetivos cálculos, foi necessário considerar o contributo da caldeira em kWh para posteriormente serem deduzidos nas necessidades energéticas de aquecimento. Como tal, procedeu-se ao uso de uma folha de cálculo em formato Excel[®] [48], cujo intuito é calcular a contribuição anual dos sistemas a biomassa para aquecimento de ar. Com as características do edifício de referência e baseado no RCCTE, esta ferramenta estimou que para suprir as necessidades de aquecimento na área que constitui a sala, o equipamento deve consumir, por ano, cerca de 135kg de *pellets*, perfazendo um total de 587kWh.

Analisadas as medidas de eficiência energética a estudar, efetua-se então a seleção e identificação dos pacotes de medidas em estudo. Numa primeira fase, procedeu-se à seleção

de um conjunto de 10 pacotes de medidas, desprovidos de opções renováveis, cuja análise serviu para implementar metodologias, ganhar sensibilidade aos principais parâmetros de cálculo e selecionar os equipamentos que dão origem às soluções mais rentáveis. Os 10 pacotes de medidas desta análise preliminar encontram-se explanados no Quadro 5.1, bem como os seus custos de implementação. Estes pacotes foram escolhidos de forma ponderada, selecionando um conjunto de medidas ajustadas à realidade nacional. Combinaram-se medidas de melhoria que incluem várias espessuras de isolamentos, diferentes envidraçados e vários tipos de equipamentos de climatização e de preparação de AQS.

Numa segunda fase, segue-se uma análise ao isolamento da envolvente, paredes e cobertura, com o intuito de verificar a influência da alteração da zona climática na obtenção do ponto de custo ótimo. O Quadro 5.5 representa os pacotes considerados para a análise aos isolamentos, tendo-se considerado materiais de EPS e de lã mineral, visto que apresentam excelente desempenho energético e económico como foi referido na subsecção 4.2.1. Os envidraçados e equipamentos selecionados nesta observação são sempre os mesmos, com o intuito de observar a influência apenas das espessuras de isolamento.

De modo análogo, realiza-se também o estudo de diferentes envidraçados em diferentes localidades, procurando identificar possíveis alterações no ótimo de rentabilidade. Os pacotes de medidas para o estudo das janelas, encontram-se identificados no Quadro 5.7. A seleção do caixilho de PVC deve-se ao facto de este ter apresentado ser o melhor caixilho em termos de rentabilidade económica, como foi mencionado na subsecção 4.2.2.

Identificadas as melhores opções dentro de cada aspeto estudado, nomeadamente espessuras e tipos de isolamentos, tipos de janelas e equipamentos, realiza-se uma análise final com a seleção de 12 pacotes de medidas de eficiência energética. Estes pacotes, listados no Quadro 5.9, constituem as medidas mais rentáveis economicamente, incluindo também, soluções de energia renovável. Com este conjunto de pacotes de medidas final pretende-se não só avaliar o incremento de soluções renováveis no cálculo do custo ótimo, como também realizar uma análise de sensibilidade às taxas de desconto e possíveis cenários de evolução do preço da energia.

4.3 Necessidades de energia primária

Para o cálculo das necessidades energéticas correspondentes a cada pacote de medidas aplicado no edifício, utilizou-se a metodologia prevista no RCCTE, conforme foi explanada na secção 3.4.

Em Portugal, os fatores de conversão entre energia útil e energia primária são definidos periodicamente por despacho do diretor-geral de Geologia e Energia em função do mix energético nacional na produção de eletricidade [14]. Para economias de eletricidade em kWh, os Estados-Membros podem aplicar um coeficiente de 2.5 por omissão, refletindo a estimativa de uma média de 40 % de eficiência da produção da União Europeia durante o período em causa. No entanto, segundo a Diretiva 2006/32/CE [32], os Estados-Membros podem aplicar um coeficiente diferente desde que o justifiquem. Posto isto, os fatores de conversão entre energia útil e energia primária a utilizar na determinação das necessidades nominais anuais de energia primária são de $2.5\text{kWh}_{EP}/\text{kWh}$ para eletricidade, independentemente da origem (renovável ou não renovável) e $1\text{kWh}_{EP}/\text{kWh}$ para combustíveis sólidos, líquidos e gasosos não renováveis [49].

Em síntese, os fatores de conversão utilizados no cálculo das necessidades energéticas foram:

- Biomassa: $1\text{kWh}_{EP}/\text{kWh}$
- Eletricidade: $2.5\text{kWh}_{EP}/\text{kWh}$
- Gás Natural: $1\text{kWh}_{EP}/\text{kWh}$

No sentido de analisar a influência das zonas climáticas no cálculo das necessidades energéticas do respetivo edifício, e procurando abranger todo o território nacional e, consequentemente, todas as exigências climáticas, implantar-se-á medidas de eficiência energética considerando as zonas climáticas de Coimbra, Évora, Porto e Bragança. No Quadro 4.5 encontram-se sintetizados os dados climáticos referentes a cada localidade.

Quadro 4.5 – Dados climáticos

Cidade	Altitude (m)	Estação de Aquecimento					Estação de Arrefecimento					
		Zona Climática	Duração (meses)	Graus-Dias (°C)	Temperatura exterior média (°C)	Energia solar média mensal ($\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{mês})$)	Zona Climática	Duração (horas)	Temperatura exterior média (°C)	Energia solar acumulada (kWh/m^2)		
										90° N	90° S	90° O
Bragança	500	I3	7.8	1818	5	90	V2	2928	22	170	310	355
Coimbra	100	I1	6.2	885	9	105	V2	2928	21	170	310	370
Évora	300	I1	5.9	958	9	110	V3	2928	24	170	305	375
Porto	100	I2	6.9	1068	9	95	V2	2928	20	165	315	360

4.4 Cálculo do custo global

Adquiridas as necessidades energéticas respeitantes a cada medida, procede-se ao cálculo do custo global. O cálculo foi realizado ao longo de um período de 30 anos, conforme é especificado no Regulamento Delegado nº244 [6]. Foram tidos em conta os custos de investimento inicial, de substituição, de manutenção, de exploração, bem como o valor residual dos materiais que, ao fim dos 30 anos, ainda possuem valor de mercado. O valor residual foi apenas aplicado aos equipamentos e sistemas renováveis, pois possuem um ciclo de vida de 20 anos, sendo substituídos no final desse período. Isto é, no final do período de cálculo os equipamentos possuem um valor residual que deve ser descontado no cálculo do custo global. Considera-se para o efeito, uma depreciação linear dos sistemas considerando que no final do ciclo de vida não possuem qualquer valor. A Figura 4.3 ilustra um exemplo do cálculo do valor residual de uma componente de um edifício com um tempo de vida superior ao período de cálculo.

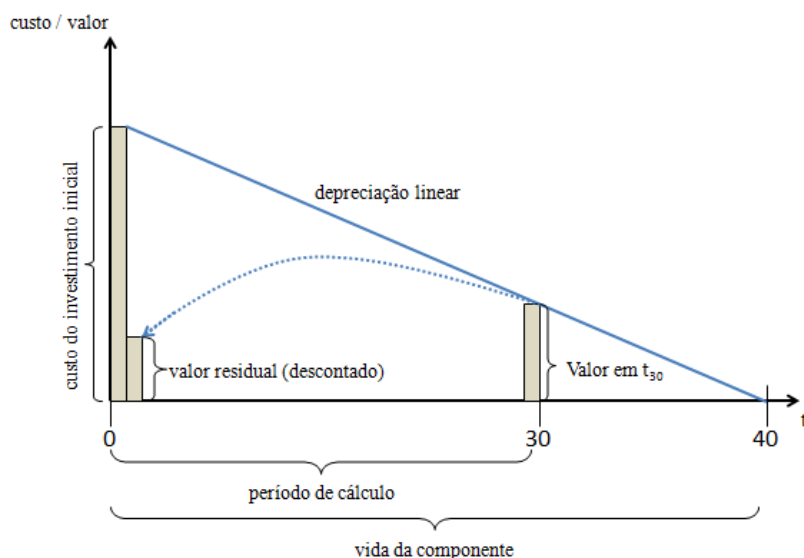


Figura 4.3 – Cálculo do valor residual de um componente de um edifício [31]

No cálculo do custo global, os custos inerentes aos equipamentos e materiais, tais como custos de aquisição, manutenção e de instalação, constituem dados de entrada relevantes para a obtenção de resultados realistas. Estas informações são escassas e difíceis de estimar, como tal, para o efeito, foi utilizado o gerador de preços do CYPE [50]. Além disso, alguns custos de equipamentos foram obtidos em lojas da especialidade. À falta de algumas informações, e para equidade das medidas seleccionadas, os custos de manutenção dos materiais e equipamentos foram considerados de 4% do custo inicial. Todas as categorias de custos foram consideradas com o valor presente líquido através de uma taxa de desconto de 3%.

No sentido de realizar uma análise de sensibilidade aos parâmetros utilizados, conforme é sugerido no Regulamento nº244/2012 [6], optou-se por utilizar as taxas de desconto de 3% e de 6% para os cálculos macroeconómicos. A adoção da taxa de 6% tem por base a evolução das emissões de dívida pública que, para o caso português, ronda os 6% a 30 anos [51], sendo que parece coerente utilizar esta mesma taxa de desconto no estudo. No cálculo financeiro foram consideradas as taxas de 3% e 8%, permitindo realizar uma análise a dois cenários distintos. Os cenários considerados encontram-se resumidos no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Síntese das taxas de desconto seleccionadas

	Cenário	Taxa de desconto
Cálculo Financeiro	Capital próprio para investir	3%
	Empréstimo bancário	8%
Cálculo Macroeconómico	Otimista	3%
	Pessimista	6%

A evolução dos preços de energia, bem como a relação com a taxa de desconto influenciam o cálculo dos custos globais e podem mudar um pouco o ponto ótimo de rentabilidade [23]. Embora a metodologia proponha a utilização de um guia de evolução de preços [52] (Figura 4.4), no presente estudo optou-se por considerar uma taxa constante de aumento de 3% ao ano para os tipos de energia utilizados nas simulações (biomassa, eletricidade e gás natural). Esta opção prende-se com o verificado nos últimos anos em Portugal, por exemplo entre 2010 e 2011 houve um aumento de 4% do preço da eletricidade [53]. Posteriormente para uma análise de sensibilidade, considera-se taxas de evolução dos preços de energia de 1% e 4.5%.

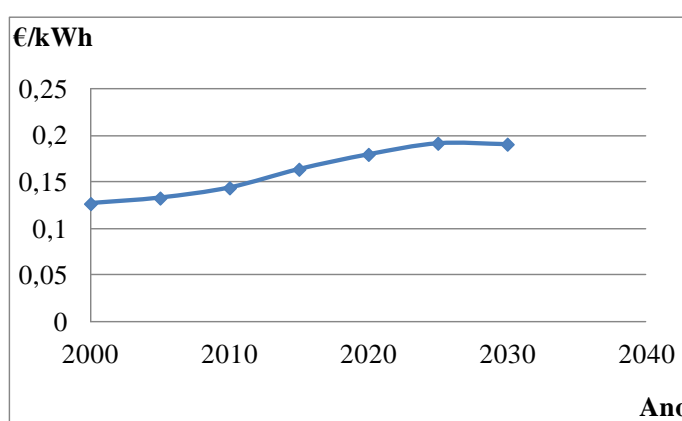


Figura 4.4 – Preços de eletricidade em €/kWh, incluindo taxas [52]

Os preços da eletricidade e do gás natural foram obtidos a partir dos dados que constam do portal da ERSE e da análise de faturação [54],[55]. Relativamente ao preço dos *pellets* foi

considerado o preço obtido no comércio da especialidade. Como tal, para o ano exploração inicial os preços de energia considerados encontram-se expressos no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Preços de energia no ano inicial

Análise	Eletricidade (€/kWh)	Gás Natural (€/kWh)	<i>Pellets</i> (€/kWh)
Financeira	0.207	0.075	0.053
Macroeconómica	0.105	0.061	0.043

Na determinação do custo global de uma medida, no contexto macroeconómico, os preços a ter em conta devem estar isentos de taxas. No entanto, este contexto deve incutir os custos das emissões de CO₂ definidos na metodologia. Deste modo, é necessário ter em conta a utilização de fatores de emissão de CO₂ para cada pacote de medidas. Estes fatores prendem-se com o tipo de energia utilizada para suprir as necessidades energéticas da habitação. Assim, os fatores aplicados à eletricidade são de 0.369tCO₂/MWh, 0.202tCO₂/MWh no que respeita ao consumo de gás natural e fatores nulos para a utilização de energia renovável [56].

No contexto do cálculo financeiro, os preços a ter em conta são os valores pagos pelo cliente, incluindo impostos, IVA e outros impostos (nomeadamente associados à eletricidade). O valor de IVA em Portugal, à data, situa-se nos 23% e abrange todo o tipo de equipamentos, materiais e custos de energia considerados no estudo.

Identificada a forma de implementação da metodologia, bem como, os parâmetros e premissas consideradas, segue-se no seguinte capítulo a apresentação e análise dos resultados obtidos.

5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Apresentada a metodologia, o seu modo de implementação e as medidas de eficiência escolhidas, segue-se a apresentação e análise dos resultados obtidos. Como primeira abordagem da metodologia, podendo-se denominar como estudo preliminar, foram considerados os pacotes de medidas preliminares (PMP) indicados no Quadro 5.1. Neste quadro indica-se também o custo de investimento inicial associado a cada pacote.

Quadro 5.1 – Descrição dos pacotes de medidas para análise preliminar (PMP)

	PMP 1	PMP 2	PMP 3	PMP 4	PMP 5	PMP 6	PMP 7	PMP 8	PMP 9	PMP 10
Isolamento das paredes										
EPS 40mm	*								*	
EPS 50mm		*			*	*				*
EPS 60mm			*				*	*		
EPS 80mm				*						
Isolamento da cobertura										
XPS 50mm	*								*	
XPS 60mm		*								*
XPS 80mm			*		*	*				
XPS 100mm				*			*	*		
Envidraçados										
PVC	*	*	*		*	*	*	*	*	*
Alumínio				*						
Equipamentos										
Caldeira elétrica			*						*	
Esquentador a gás	*	*		*						*
Caldeira a gás					*		*			
Bomba de calor						*		*		
Ar condicionado	*	*	*	*	*		*		*	*
Radiadores					*		*			
Ventiladores						*		*		
Emissores elétricos									*	*
Custo inicial [c/ IVA]	23.519 €	23.834 €	23.820 €	25.956 €	27.685 €	33.828 €	28.243 €	34.385 €	24.024 €	24.911 €

Esta análise considera o edifício de referência localizado na cidade de Coimbra. Deste modo as necessidades energéticas obtidas, com a aplicação da metodologia prevista no RCCTE, para estes pacotes de medidas, juntamente com as necessidades energéticas do edifício antes da intervenção (base), são indicadas no Quadro 5.2. De assinalar, a elevada redução dos consumos energéticos, conseguida com a aplicação das medidas de eficiência energética, em relação à solução referência.

Quadro 5.2 – Necessidades energéticas dos PMP

	N_{ic} kWh/(m ² .a)	Redução %	N_{vc} kWh/(m ² .a)	Redução %	Q_a kWh/(m ² .a)	N_{tc} kWh _{EP} /(m ² .a)	Redução %
Base	102.5		20.2		27.4	305.9	
PMP 1	24.3	76.3	13.6	32.4	27.4	59.7	80.5
PMP 2	21.4	79.1	13.3	34.1	27.4	57.7	81.1
PMP 3	18.5	81.9	12.8	36.5	27.4	115.7	62.2
PMP 4	16.7	83.7	12.3	38.9	27.4	54.1	82.3
PMP 5	19.6	80.9	12.8	36.3	27.4	62.9	79.4
PMP 6	19.6	80.9	12.8	36.3	27.4	49.6	83.8
PMP 7	17.3	83.1	12.5	38.1	27.4	60.2	80.3
PMP 8	17.3	83.1	12.5	38.1	27.4	47.5	84.5
PMP 9	24.3	76.3	13.6	32.4	27.4	165.8	45.8
PMP10	21.4	79.1	13.3	34.1	27.4	98.2	67.9

Obtidas as necessidades energéticas dos pacotes de medidas procede-se ao cálculo do custo global. Para o efeito, considerou-se uma taxa de desconto de 3% e um incremento anual de 3% para os custos de energia, nomeadamente eletricidade e gás natural. Tais taxas percentuais serão aplicadas em todos os futuros cálculos, caso nada seja dito em contrário. No Quadro 5.3 indicam-se os custos de iniciais, de exploração e totais dos 10 pacotes de medidas considerados na análise preliminar, nas perspetivas financeira e macroeconómica. Como se verifica, os custos de exploração em 30 anos representam uma elevada quantia dos custos globais. Os custos iniciais da solução base prendem-se com a substituição dos equipamentos em final de vida, bem como algumas intervenções na fachada como, a reparação de eventuais fissuras, limpeza mecânica com jato de água, pintura de paredes e aluguer de andaimes. Estes custos de intervenção foram considerados em todos os pacotes de medidas para uma análise equitativa.

Quadro 5.3 – Custos iniciais, de exploração e totais dos PMP

Solução	Custos iniciais		Custos de exploração		Custos totais	
	Financ.	Macro.	Financ.	Macro.	Financ.	Macro.
Base	12.108 €	9.844 €	57.863 €	37.576 €	69.970 €	47.420 €
PMP 1	23.519 €	19.121 €	22.235 €	17.552 €	45.754 €	36.673 €
PMP 2	23.834 €	19.377 €	22.156 €	17.556 €	45.990 €	36.933 €
PMP 3	23.820 €	19.366 €	31.891 €	21.851 €	55.711 €	41.217 €
PMP 4	25.956 €	21.103 €	21.076 €	16.799 €	47.032 €	37.901 €
PMP 5	27.685 €	22.508 €	26.233 €	21.453 €	53.918 €	43.962 €
PMP 6	33.828 €	27.502 €	22.374 €	16.444 €	56.202 €	43.946 €
PMP 7	28.243 €	22.962 €	26.266 €	21.467 €	54.508 €	44.429 €
PMP 8	34.385 €	27.956 €	22.477 €	16.600 €	56.862 €	44.556 €
PMP 9	24.024 €	19.532 €	39.553 €	26.314 €	63.577 €	45.846 €
PMP 10	24.911 €	20.253 €	28.948 €	21.535 €	53.859 €	41.788 €

Realizados os cálculos globais procede-se à análise da curva de custo ótimo expressa na Figura 5.1, onde se observa a análise nas perspetivas financeira e macroeconómica.

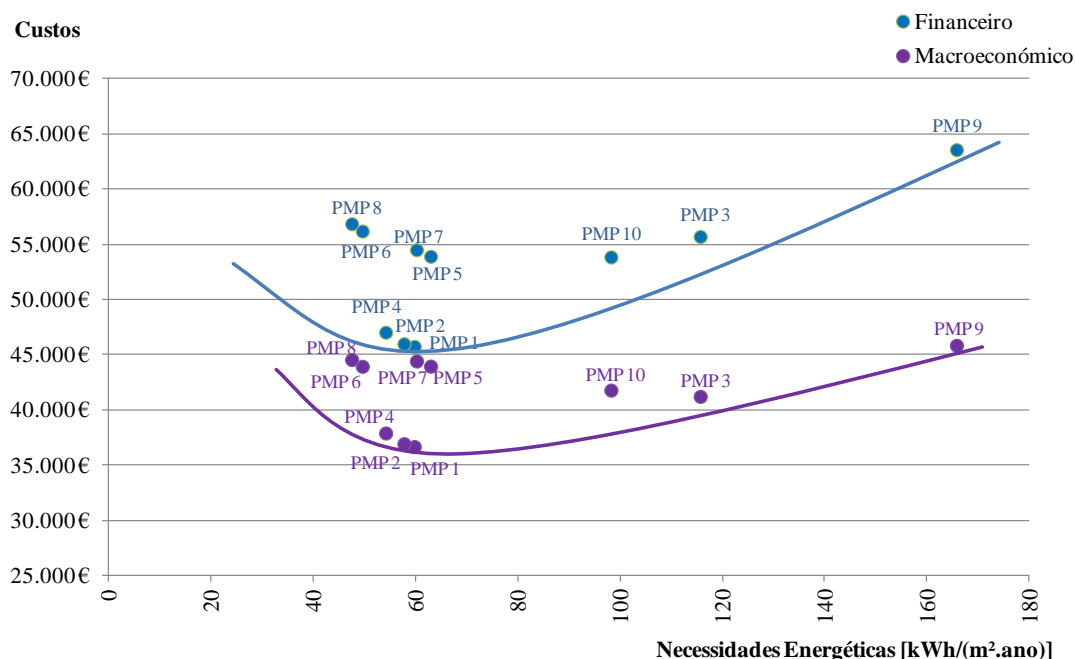


Figura 5.1 – Curva de custo ótimo dos PMP

Como se constata na figura anterior, o tipo de curva da análise financeira e da análise macroeconómica mantém-se semelhante, observando-se apenas uma translação da curva no sentido da redução de custos. De facto, é natural que o cálculo financeiro apresente maiores

custos globais, pois considera o custo dos materiais, equipamentos e preços de energia acrescidos de impostos. Em ambas as vertentes, os pacotes de medidas que adquirem um melhor custo global ao longo do período de cálculo são os PMP 1, PMP 2 e PMP 4. Em comum, estes pacotes de medidas têm o equipamento de ar condicionado para climatização e um esquentador a gás para suprir as necessidades de AQS.

De facto, no que diz respeito à composição dos pacotes de medidas, os sistemas de aquecimento são os que mais influenciam o custo global. Quando considerado o ar condicionado, aparelho com elevada eficiência (COP 4.1), o elevado investimento inicial, cerca de 4000€, é facilmente compensado pela economia de energia obtida ao longo dos 30 anos de cálculo. Quanto ao sistema de produção de AQS, o esquentador a gás prova ser melhor opção do que a caldeira elétrica (PMP 3), pois, embora o equipamento a gás seja mais caro cerca de 335€ do que o equipamento elétrico, o facto de usar o gás natural como combustível, que é mais barato e mais sustentável (aplicação fator de conversão =1), torna esta solução mais vantajosa.

Dado que se verificou que o equipamento mais rentável economicamente foi o ar condicionado, este constituirá todos os pacotes de medidas posteriormente analisados para suprir necessidades de aquecimento e arrefecimento. De modo análogo, será considerado o esquentador a gás para fazer face às necessidades de AQS.

Comparando as necessidades nominais globais de energia primária do pacote com menor custo global, PMP 1, com o valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia primária estabelecidos [34], verifica-se um desfasamento de 13%, como se observa no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Comparação do nível ótimo do PMP 1 com os requisitos mínimos

	PMP 1
N_{tc} [kWh_{EP}/(m².ano)]	59.7
N_t [kWh_{EP}/(m².ano)]	68.8
Redução	13%

Realizada a análise preliminar, em que se identificou os equipamentos com melhor viabilidade económica, pretende-se agora, verificar a influência da localização do edifício, na obtenção do ponto ótimo de rentabilidade. Como tal, considera-se pacotes de medidas com diferentes espessuras de isolamento, poliestireno expandido moldado e lã mineral, como indica o Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Descrição dos pacotes de medidas para análise do isolamento térmico (PMI)

PMI 1	Envolvente: EPS30mm + Cobertura: EPS40mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMI 2	Envolvente: EPS40mm + Cobertura: EPS50mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMI 3	Envolvente: EPS50mm + Cobertura: EPS60mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMI 4	Envolvente: EPS60mm + Cobertura: EPS80mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMI 5	Envolvente: EPS80mm + Cobertura: EPS100mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMI 6	Envolvente: EPS100mm + Cobertura: EPS120mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMI 7	Envolvente: EPS30mm + Cobertura: MW40mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMI 8	Envolvente:EPS40mm + Cobertura: MW50mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMI 9	Envolvente: EPS50mm + Cobertura: MW60mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]]
PMI 10	Envolvente: EPS60mm + Cobertura: MW80mm +PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMI 11	Envolvente: EPS80mm + Cobertura: MW100mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMI 12	Envolvente: EPS100mm + Cobertura: MW120mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMI 13	Envolvente: EPS120mm + Cobertura: MW140mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]

Considerando apenas a colocação de EPS na envolvente e cobertura (PMI 1 a PMI 6), verifica-se uma alteração nas curvas de custo ótimo consoante a zona climática, como se observa na Figura 5.2. A região com maiores necessidades de aquecimento, Bragança, favorece maior espessura de isolamento (PMI 4). Regiões mais amenas como o Porto, não necessitam de tanta espessura de isolamento assim, a curva de custo ótimo privilegia espessuras mais finas (PMI 2 e PMI 3).

As linhas verticais representadas nas Figuras 5.2 a 5.7 representam o valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia primária em kWh_{EP}/(m².ano), isto é, representam os

requisitos mínimos energéticos estabelecidos na portaria técnica do RCCTE [34]. Estes valores são definidos em função da zona climática, sendo portanto distintos de caso para caso. Deste modo, as linhas verticais correspondentes ao N_t permitem, de forma intuitiva, uma rápida comparação da distância entre os níveis ótimos obtidos e os requisitos mínimos.

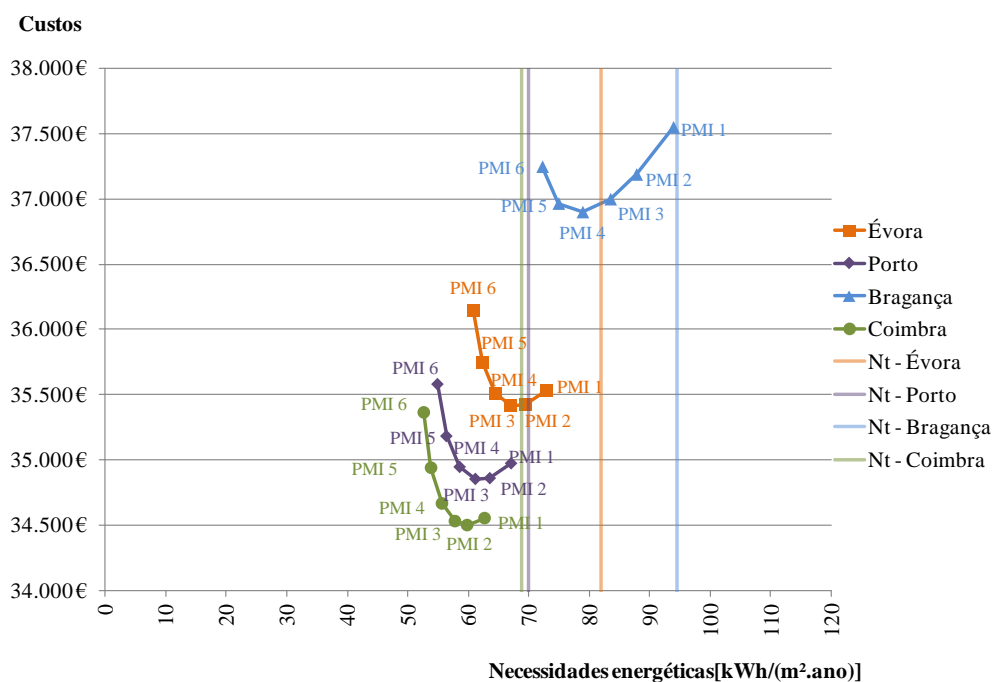


Figura 5.2 – Curvas de custo ótimo na perspetiva macroeconómica dos PMI 1 a PMI 6

Na análise detalhada à colocação de EPS nas paredes e de MW como isolamento na cobertura (PMI 7 A PMI 13), ilustrada na Figura 5.3, verifica-se a mesma tendência observada na figura anterior, embora as curvas sejam menos pronunciadas. Enquanto em Évora e Porto não se verifica vantagens em aumentar a espessura de isolamentos, pois o PMI 7 é o mais rentável, em Bragança, nota-se uma melhoria de custos globais com o aumento da espessura do material isolante. No entanto, as diferenças dos custos globais não são substanciais, tal como indica a curva mais plana correspondente ao clima de Bragança.

Comparando a Figura 5.2 com a Figura 5.3, constata-se, que a substituição do isolamento da cobertura de EPS por MW modifica a forma da curva, bem como, as espessuras que caracterizam o ótimo de rentabilidade. Desta forma, o custo da lã mineral, cerca de 60% mais caro do que o EPS, realça a influência dos custos iniciais na aplicação da metodologia de cálculo da rentabilidade ótima.

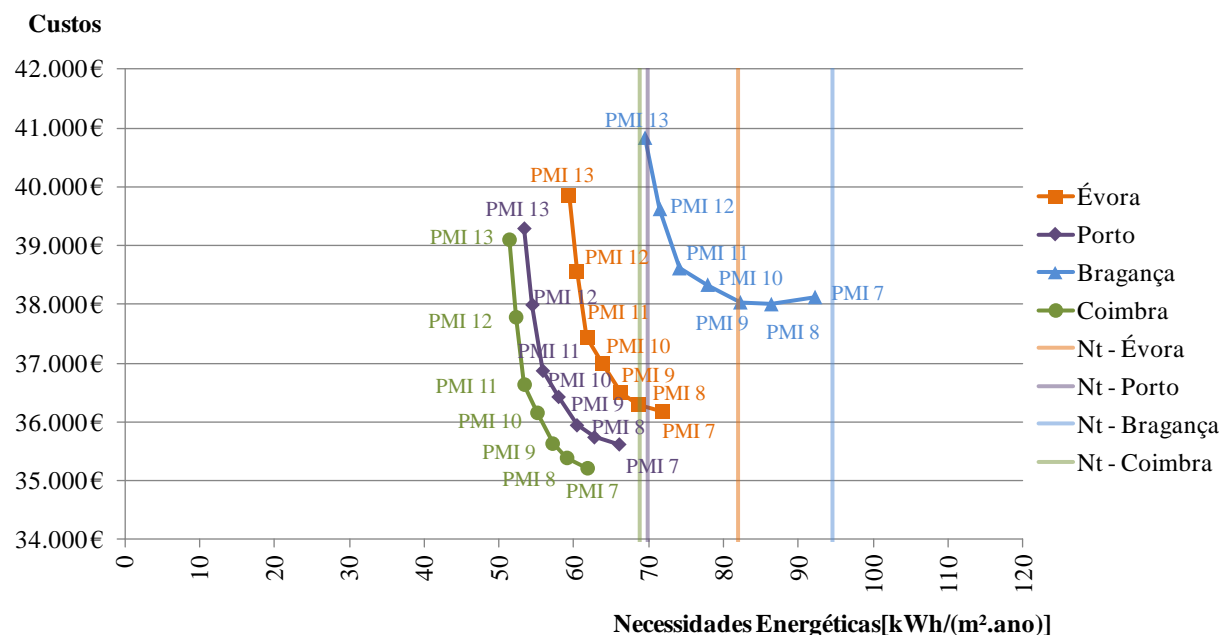


Figura 5.3 – Curvas de custo ótimo na perspetiva macroeconómica dos PMI 7 a PMI 13

Na estação de aquecimento, o incremento de 10mm de isolamento térmico, quer na cobertura, quer nas paredes, entre cada medida considerada, reduz em cerca de 11,4% as necessidades energéticas de Inverno. Já na estação de arrefecimento, para o mesmo incremento de espessura de isolamento, apenas se verifica uma redução de 2,5% de necessidades energéticas de Verão. Estes valores explicam, de forma empírica, os resultados da aplicação da metodologia de custo ótimo, em que se verifica que o ponto ótimo de rentabilidade numa zona climática com maiores necessidades de aquecimento, tende a indicar como vantajoso uma maior espessura de isolamento, reduzindo as perdas e permitindo uma maior economia monetária ao longo do período de cálculo.

A comparação das necessidades globais de energia primária dos pacotes com melhor rentabilidade económica com os valores máximos encontra-se sintetizada no Quadro 5.6. Verifica-se uma redução média de cerca de 12% do desempenho energético obtido em relação aos requisitos mínimos.

Quadro 5.6 – Comparação do nível ótimo dos PMI com os requisitos mínimos

Localização	Coimbra		Évora		Porto		Bragança	
Pacote de medidas	PMI 2	PMI 7	PMI 3	PMI 7	PMI 3	PMI 7	PMI 4	PMI 8
N_{tc} [kWh _{EP} /(m ² .ano)]	59.8	61.9	67.1	71.9	61.2	66.1	79.0	86.4
N_t [kWh _{EP} /(m ² .ano)]	68.8	68.8	81.9	81.9	69.9	69.9	94.5	94.5
Redução	13%	10%	18%	12%	12%	5%	16%	9%

Analisados os tipos e espessuras dos isolamentos, segue-se uma breve análise aos envidraçados do edifício de referência. Como tal, de modo análogo ao realizado anteriormente para os isolamentos, procedeu-se a uma análise de alguns envidraçados com caixilho em PVC nas zonas climáticas em estudo. As medidas dos envidraçados analisados encontram-se resumidas no Quadro 5.7, cuja curva de custo ótimo, demonstrada na Figura 5.4, prova que a alteração das zonas climáticas causa pouca influência na escolha da melhor solução, embora possa modificar a obtenção do ponto ótimo.

Quadro 5.7 – Descrição dos pacotes de medidas para análise dos envidraçados (PMJ)

PMJ 1	Envolvente: EPS80mm + Cobertura: MW100mm + PVC_U1.7 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMJ 2	Envolvente: EPS80mm + Cobertura: MW100mm + PVC_U2.61 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMJ 3	Envolvente: EPS80mm + Cobertura: MW100mm + PVC_U2.57 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMJ 4	Envolvente: EPS80mm + Cobertura: MW100mm + PVC_U1.4+ [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]

Esta análise é pouco conclusiva, dado que apenas se considerou 4 tipos de envidraçados diferentes, pois o objetivo era apenas selecionar qual o melhor envidraçado com caixilho em PVC. Verifica-se então, que as melhores soluções são as descritas nos PMJ 2 e PMJ 4.

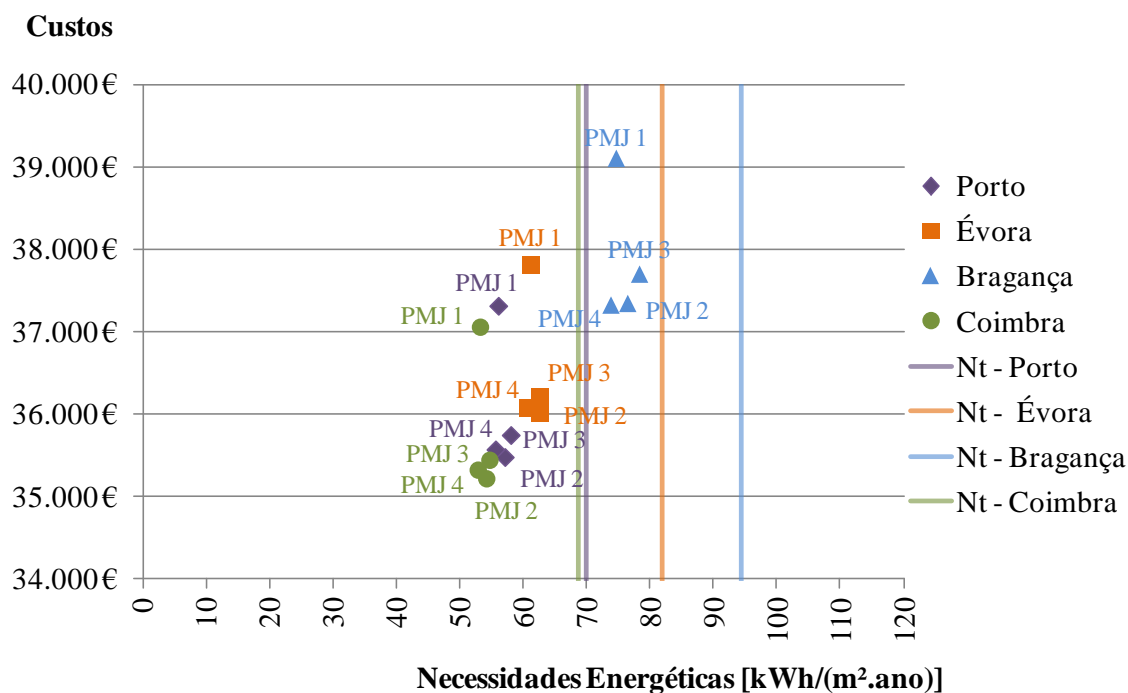


Figura 5.4 – Curvas de custo ótimo na perspectiva macroeconómica dos PMJ

A comparação das necessidades globais de energia primária dos pacotes com melhor rentabilidade económica com os valores máximos encontra-se sintetizada no Quadro 5.8. Nesta análise, verifica-se uma redução média de cerca de 21% do desempenho energético obtido em relação aos requisitos mínimos, que constitui uma distorção algo considerável. Tal distorção prende-se essencialmente com as espessuras de isolamento térmico consideradas nos pacotes.

Quadro 5.8 – Comparação do nível ótimo dos PMJ com os requisitos mínimos

Localização	Coimbra	Évora	Porto	Bragança
Pacote de medidas	PMJ 2	PMJ 2	PMJ 2	PMJ 4
N_{tc} [kWh _{EP} /(m ² .ano)]	54.3	62.7	57.1	73.9
N_t [kWh _{EP} /(m ² .ano)]	68.8	81.9	69.9	94.5
Redução	21%	24%	18%	22%

Com esta análise mais pormenorizada das medidas de reabilitação energética na envolvente, verificou-se que os pacotes de medidas que melhor contribuem para a obtenção de um ponto ótimo de rentabilidade. Deste modo, selecionando as melhores medidas obtidas, procedeu-se à análise dos equipamentos de energias renováveis, nomeadamente, o solar térmico, o sistema fotovoltaico e um equipamento a biomassa.

Em suma, as soluções verificadas mais rentáveis foram: isolamento de EPS nas paredes e cobertura; nas janelas, envidraçado duplo com caixilho em PVC, fator solar global de 0.50 e $U=1.4W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, esquentador a gás para produção de AQS e o sistema de ar condicionado para climatização. O Quadro 5.9 expõe as 12 medidas finais, que inclui as melhores soluções verificadas anteriormente, opções de energia renovável e a caracterização do cenário referência (base), ou seja, o estado em que se encontra o edifício antes da intervenção a realizar.

Quadro 5.9 – Descrição dos pacotes de medidas para análise final (PMF)

Base	Envolvente: U2 + Cobertura: U2.8+Envidraçados: U5.1 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado] + [Resistência elétrica]
PMF 1	Envolvente: EPS40mm + Cobertura: XPS50mm + PVC_U2 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMF 2	Envolvente: EPS40mm + Cobertura: EPS50mm + PVC_U1.4 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMF 3	Envolvente: EPS50mm + Cobertura: EPS60mm + PVC_U1.4+ [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMF 4	Envolvente: EPS60mm + Cobertura: EPS80mm + PVC_U1.4 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMF 5	Envolvente: EPS30mm + Cobertura: MW40mm + PVC_U1.4+ [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMF 6	Envolvente: EPS40mm + Cobertura: MW50mm + PVC_U1.4 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMF 7	Envolvente: EPS80mm + Cobertura: MW100mm + PVC_U1.4 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado]
PMF 8	Envolvente: EPS40mm + Cobertura: EPS50mm + PVC_U1.4 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado] + Solar Térmico
PMF 9	Envolvente: EPS40mm + Cobertura: EPS50mm + PVC_U1.4 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado] + Fotovoltaico c/baterias
PMF 10	Envolvente: EPS40mm + Cobertura: EPS50mm + PVC_U1.4 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado] + Solar Térmico + Fotovoltaico c/ venda à rede
PMF 11	Envolvente: EPS40mm + Cobertura: EPS50mm + PVC_U1.4 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado] + Salamandra a biomassa
PMF 12	Envolvente: EPS40mm + Cobertura: EPS50mm + PVC_U1.4 + [Esquentador a gás] + [Ar Condicionado] + Solar Térmico + Salamandra a biomassa

Como demonstra a curva de custo-ótimo presente na Figura 5.5, cuja localização considerada foi Coimbra, o incremento de opções renováveis (PMF 8 a PMF 12) parece não melhorar substancialmente o ponto ótimo de rentabilidade. Embora os pontos se desloquem claramente para a esquerda, redução das necessidades de energia primária, os custos totais ao longo do ciclo de vida não apresentam melhorias significativas, agravando-se até, em algumas medidas. Relativamente à solução base que apresenta um consumo anual de energia primária de $306kWh/(m^2 \cdot ano)$, esta adquire custos globais de 69.740€ e 47.233€ nas perspetivas

financeira e macroeconómica, respetivamente. Embora tenha sido considerado a substituição dos equipamentos antigos, por equipamentos mais eficientes ao longo do período de cálculo, a não intervenção na envolvente acarreta altos desperdícios de energia, como indica os elevados valores obtidos.

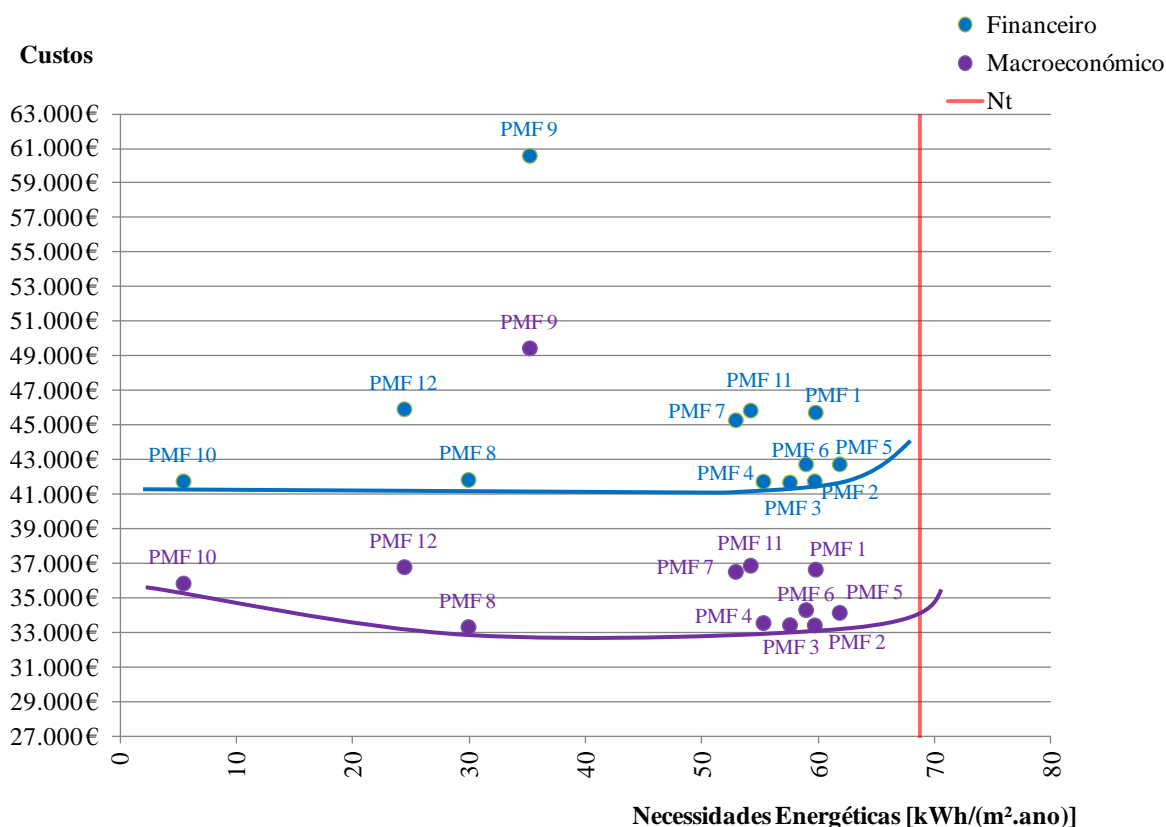


Figura 5.5 – Curva de custo ótimo dos PMF

Como se verificou na figura anterior, o sistema fotovoltaico com baterias para acumular energia (PMF 9) não se verificou viável economicamente. Embora torne autossuficiente a habitação em termos elétricos, o elevado custo do sistema, acrescido do preço das baterias (cerca de 4500€), torna inviável esta opção para o edifício referência. No entanto, o sistema fotovoltaico com venda de energia à rede em regime bonificado (PMF 10) torna-se uma solução mais atraente. Embora não constitua um ponto ótimo, do ponto de vista macroeconómico, do ponto de vista financeiro, devido aos custos de eletricidade superiores, torna-se uma das soluções mais rentáveis, sendo que não se evidencia destacadamente de outros pacotes. Os resultados demonstram claramente a importância dos mecanismos de incentivo, tais como subsídios e tarifas bonificadas, para que os dispositivos solares se tornem competitivos.

No que diz respeito ao solar térmico (PMF 8), a sua inclusão também parece não melhorar substancialmente o custo global ao fim dos 30 anos de cálculo, encontrando-se próxima de outras soluções sem energia renovável. Tal situação prende-se com os custos de manutenção que foram considerados, ou seja, 4% do custo de aquisição que perfaz cerca de 67€ por ano. Este valor é discutível, e caso fosse optado por considerar custos de manutenção deste equipamento à volta dos 50€ anuais, esta medida figuraria como a opção com custo global mais baixo. De facto, os custos de manutenção são bastante difíceis de estimar e influenciam grandemente o resultado final, constituindo uma das grandes dificuldades à aplicação da metodologia.

A utilização de energia renovável, nomeadamente a solar, constitui um passo importante para tornar uma habitação num edifício com necessidades quase nulas de energia – conceito NZEB. A implementação do PMF 10, que contempla o sistema fotovoltaico e o solar térmico obrigatório aquando a realização de um contrato em regime bonificado, reduz as necessidades energéticas para apenas 5.4kWh/(m².ano).

Nos PMF 11 e PMF 12 foram considerados equipamentos de biomassa dimensionados para suprir apenas parte das necessidades de aquecimento. Contudo, estas medidas agravaram os custos globais nas duas perspetivas, ou seja, não constituem um bom investimento.

O Quadro 5.10 analisa a implementação destes 12 pacotes de medidas noutras zonas climáticas, expondo os seus custos globais. Como se pode observar, verifica-se algumas diferenças consoante a localização do edifício de referência. Note que, do ponto de vista macroeconómico, a inclusão de energias renováveis não se traduz em grandes economias de monetárias, ao contrário do que seria de esperar, já que esta perspetiva engloba os preços do CO₂. Com este resultado pode-se concluir que os custos do carbono são demasiado baixos para estimular medidas que utilizem recursos renováveis. Ao invés, no cálculo financeiro, o PMF 10 destaca-se pela positiva, essencialmente em Évora, devido a melhores condições de insulação e consequentemente, mais produtividade dos sistemas solares. De facto, dada a diferença de preços de energia, com e sem impostos, (perspetiva financeira e macroeconómica) torna as poupanças de energia no cálculo financeiro muito mais notórias, favorecendo assim a opção por energia solar.

Quadro 5.10 – Custos globais dos PMF na perspetiva macroeconómica e financeira

	Évora		Porto		Bragança		Coimbra	
	Financ.	Macro.	Financ.	Macro.	Financ.	Macro.	Financ.	Macro.
Base	76.122 €	50.974 €	79.716 €	53.085 €	123.949 €	79.032 €	69.740 €	47.233 €
PMF 1	47.311 €	37.606 €	46.361 €	37.039 €	50.248 €	39.366 €	45.755 €	36.673 €
PMF 2	43.248 €	34.325 €	42.423 €	33.833 €	46.327 €	36.169 €	41.779 €	33.445 €
PMF 3	43.118 €	34.306 €	42.195 €	33.754 €	45.891 €	35.969 €	41.711 €	33.462 €
PMF 4	43.102 €	34.385 €	42.268 €	33.886 €	45.553 €	35.857 €	41.763 €	33.581 €
PMF 5	44.289 €	35.085 €	43.476 €	34.601 €	47.684 €	37.117 €	42.763 €	34.172 €
PMF 6	44.289 €	35.196 €	43.476 €	34.705 €	47.684 €	36.983 €	42.763 €	34.330 €
PMF 7	46.571 €	37.302 €	45.737 €	36.803 €	48.676 €	38.569 €	45.309 €	36.544 €
PMF 8	42.889 €	33.859 €	42.788 €	33.981 €	46.707 €	36.345 €	41.858 €	33.344 €
PMF 9	60.610 €	49.463 €	60.610 €	49.465 €	60.610 €	49.445 €	60.610 €	49.471 €
PMF 10	41.248 €	35.236 €	42.185 €	36.092 €	45.869 €	37.925 €	41.777 €	35.865 €
PMF 11	47.340 €	37.781 €	46.515 €	37.290 €	50.419 €	39.630 €	45.872 €	36.900 €
PMF 12	46.981 €	37.332 €	46.880 €	37.452 €	50.799 €	39.820 €	45.950 €	36.814 €

Como se pode observar no quadro anterior, existem vários pacotes de medidas com custo global semelhante, tornando-se assim difícil escolher quais os requisitos energéticos a selecionar para comparar com os requisitos mínimos energéticos estabelecidos [34]. No entanto, o Regulamento Delegado nº244/2012 [6] salvaguarda esta situação referindo que: “Caso os cálculos de otimização dos custos forneçam os mesmos custos globais para diferentes níveis de eficiência energética, incentivam-se os Estados-Membros a utilizar requisitos que resultem num menor consumo de energia primária como base para a comparação com os requisitos mínimos de desempenho energético em vigor”.

Assim, visto que o PMF 8 possui custos globais muito próximos do ótimo e apresenta menor consumo de energia primária, está encontrado o pacote de medidas que dá origem à obtenção de um nível ótimo de rentabilidade dos custos de desempenho energético para o edifício de referência. De notar, que o PMF 10 não poderia ser selecionado para a comparação com os requisitos mínimos, pois segundo a metodologia, estes parâmetros não devem ser equiparados com pacotes de medidas sujeitos a incentivos, como é o caso. O Quadro 5.11 compara os requisitos energéticos obtidos nos resultados das diferentes localizações para o PMF 8, com os requisitos mínimos estabelecidos pelo RCCTE.

Quadro 5.11 – Comparação do nível ótimo do PMF 8 com os requisitos mínimos

	Coimbra	Évora	Porto	Bragança
N_{tc} [kWh _{EP} /(m ² .ano)]	28.9	36.0	35.9	60.2
N_t [kWh _{EP} /(m ² .ano)]	68.8	81.9	69.9	94.5
Redução	58%	56%	49%	36%

Como resultado, verifica-se uma discrepância muito significativa entre o resultado do cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade e os requisitos mínimos de desempenho energético, pois ultrapassa largamente os 15%, valor referência que o Regulamento nº244 [6] indica.

Resta apenas realizar a análise de sensibilidade a diferentes taxas de desconto e diferentes padrões de evolução dos custos de energia. Para tal análise, foi considerado o edifício de referência localizado na cidade de Coimbra.

As Figura 5.6 e 5.7 demonstram a variação das curvas de custo ótimo, na perspetiva macroeconómica e financeira, respetivamente, com diferentes taxas de desconto e de diferentes cenários de evolução dos preços de energia. Os custos globais resultantes do cálculo são maiores quando se considera uma taxa de desconto menor, uma vez que os custos futuros são descontados a uma taxa mais baixa, como se observa nas seguintes figuras. O formato da curva e os pontos de otimalidade não se alteram de forma significativa com a variação da taxa de desconto, apenas se verifica uma redução substancial dos custos totais.

Quanto à evolução dos preços de energia, nota-se claramente que o aumento de custos energéticos beneficia o investimento em medidas com sistemas renováveis como o solar térmico e o fotovoltaico, reduzindo de forma mais notória os custos totais ao longo dos 30 anos.

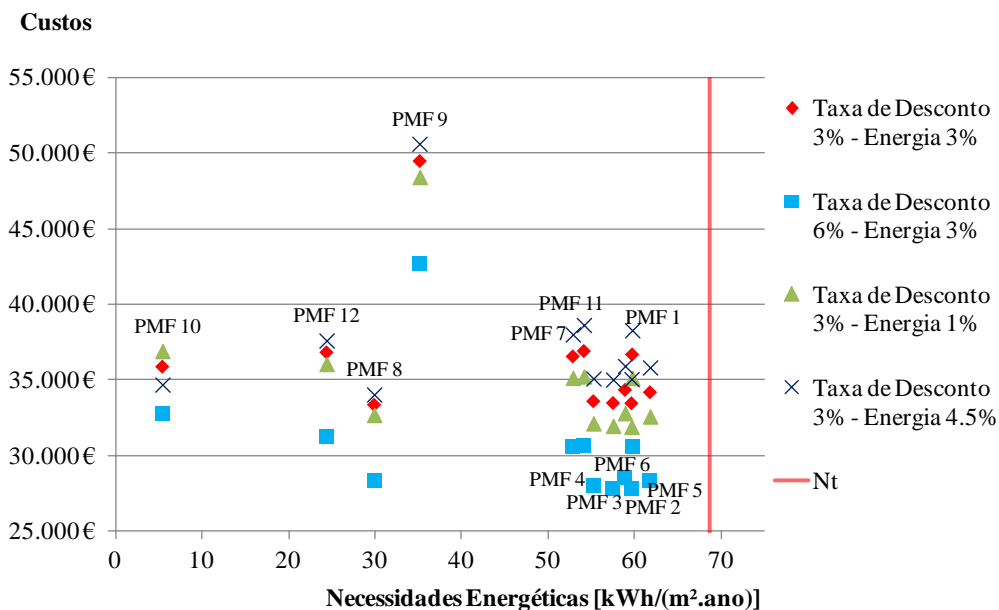


Figura 5.6 – Análise de sensibilidade aos preços de energia e taxas de desconto na perspetiva macroeconómica

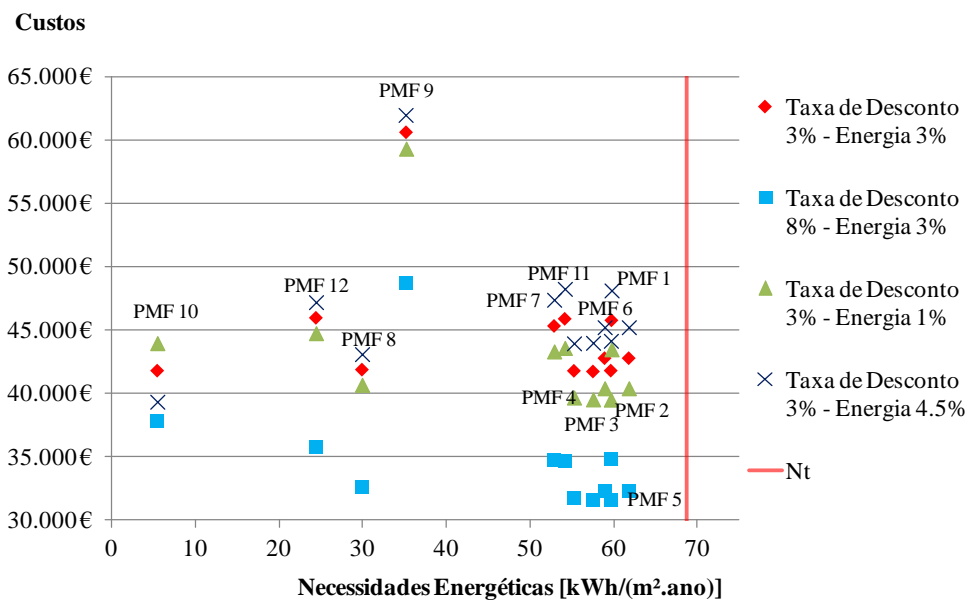


Figura 5.7 – Análise de sensibilidade aos preços de energia e taxas de desconto na perspetiva financeira

No cálculo financeiro verifica-se, de forma mais vincada, as conclusões obtidas no cálculo macroeconómico. Sendo que no cenário em que os custos de energia serão maiores, aumento anual de 4.5%, o sistema fotovoltaico em regime bonificado (PMF 10) destaca-se isoladamente como ponto ótimo.

Os Quadros 5.12 e 5.13 comparam as necessidades energéticas globais do ponto com menor custo, de cada cenário, em relação ao valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia primária previstas no RCCTE [34]. Como se pode verificar, o facto do ponto ótimo da curva de custos resultar numa solução baseada em energia renovável, eleva gritantemente a discrepância entre o resultado do cálculo e os requisitos mínimos de desempenho energético estabelecidos. Considerando um pacote de medidas sem opções renováveis, a discrepância é menor, no entanto é bastante próxima dos limites de comparação estabelecidos na metodologia, que são 15%.

Quadro 5.12 – Análise de sensibilidade macroeconómica aos requisitos mínimos dos PMF

<u>Análise Macroeconómica</u>	Taxa de desconto/ Evolução dos preços de energia			
	6% / 3%	3% / 3%	3% / 1%	3% / 4,5%
Pacote com menor custo	PMF 2	PMF 8	PMF 2	PMF 8
Ntc [kWh/(m².ano)]	59.7	29.9	59.7	29.9
Nt [kWh/(m².ano)]	68.8	68.8	68.8	68.8
Redução	13.3 %	56.5 %	13.3 %	56.5 %

Quadro 5.13 – Análise de sensibilidade financeira aos requisitos mínimos dos PMF

<u>Análise Financeira</u>	Taxa de desconto/ Evolução dos preços de energia			
	8% / 3%	3% / 3%	3% / 1%	3% / 4,5%
Pacote com menor custo	PMF 2	PMF 3	PMF 2	PMF 10
Ntc (kWh/m².ano)	59.7	57.5	59.7	5.4
Nt (kWh/m².ano)	68.8	68.8	68.8	68.8
Redução	13.3 %	16.3 %	13.3 %	92.1 %

Analisados os resultados da aplicação da metodologia, segue-se algumas considerações finais do trabalho exposto.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação consistiu no estudo da aplicação de medidas de reabilitação energética, tendo em conta a sua rentabilidade económica num período de 30 anos. Para o efeito, considerou-se um edifício multifamiliar referência representativo da realidade do parque edificado português. Com o intuito de melhorar o desempenho energético do imóvel foram selecionados alguns pacotes de medidas de eficiência energética, abrangendo a intervenção no isolamento térmico da envolvente, nos envidraçados, na instalação de equipamentos e na introdução de sistemas de energia renovável.

O estudo emprega a metodologia proposta pela Comissão Europeia, nomeadamente o Regulamento Delegado nº244/2012 [6], que define o quadro metodológico para o cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios. Através da implementação da metodologia e da análise dos resultados, pode concluir-se que:

- A seleção dos pacotes de medidas constitui uma etapa fundamental na metodologia. Esta, influencia as necessidades energéticas do edifício e consequentemente o custo global.
- Custos de materiais e equipamentos, bem como, os custos de manutenção demonstraram ser dados de entrada bastante influentes no cálculo. Tais custos são difíceis de estimar, principalmente os custos de manutenção, o que pode gerar alguma discrepância nos resultados.
- Os cálculos, na perspetiva financeira e macroeconómica, tendem a eleger o mesmo ponto de custo ótimo, embora, esta última apresente custos globais menores.
- A correlação entre as taxas de desconto adotadas e a evolução estimada do preço da energia é crucial para a viabilidade de investimentos em medidas de eficiência energética. Estimativas muito baixas do aumento de energia tendem a desencorajar o investimento, enquanto estimativas altas tendem a encorajar o investimento, essencialmente em soluções de energia solar.

- A variabilidade dos resultados obtidos é algo elevada. Tal deve-se à flexibilidade da seleção dos fatores de entrada, tais como taxas de desconto, custos de energia, seleção de medidas, zonas climáticas, etc., podendo gerar um grande número de níveis de custo ótimo. Este parece ser uma grande dificuldade na implementação da metodologia de custo-ótimo.
- Os cálculos revelaram uma diferença significativa entre os requisitos mínimos previstos e os alcançados pela metodologia, de acordo com os diferentes pressupostos considerados. Quando comparados com pacotes de medidas com energia renovável, essa diferença é ainda mais notória.

Assim, e de acordo com as opções tomadas e os resultados obtidos, a melhor opção para isolamento térmico foi a colocação de EPS nas paredes e cobertura, com espessuras entre os 40mm e os 80mm consoante a localização do edifício. No que diz respeito aos envidraçados, o vidro duplo com caixilho em PVC provou ser o mais rentável. Dentro dos equipamentos considerados, o ar condicionado e o esquentador a gás obtiveram melhores desempenhos económicos ao fim do período de cálculo.

Embora Portugal seja um país de pequena dimensão, as diferenças dos padrões climáticos das regiões influenciam de forma substancial as necessidades energéticas do edifício de referência e, como tal, os custos globais. Zonas climáticas com maiores requisitos de aquecimento, como é o caso da cidade de Bragança, aparentam privilegiar maiores espessuras de isolamento térmico na envolvente. A alteração de zonas climáticas parece afetar mais a escolha da espessura ótima do isolamento do que a escolha das janelas. No entanto, a análise aos envidraçados é pouco conclusiva, pois poucas opções foram consideradas e algumas muito semelhantes, o que corrobora a necessidade de ser estudadas pelo menos 10 pacotes de medidas, conforme é definido na metodologia.

Na perspetiva macroeconómica, o uso de energia renovável, não se mostrou tão benéfico quanto seria de esperar, pois não reduz substancialmente os custos globais em comparação com outros pacotes de medidas sem renováveis. Deste modo, considera-se que os preços do carbono atualmente estabelecido, podem ser demasiado baixos para influenciar significativamente o nível de custo ótimo. Na perspetiva financeira, os sistemas solares demonstraram ser rentáveis, essencialmente em zonas de maior insulação como Évora.

O investimento em sistemas fotovoltaicos para produção de energia elétrica, só se revela favorável graças a incentivos governamentais, tais como, a adoção de tarifas bonificadas para venda de energia à rede – microprodução. No entanto, a atual situação do país não é propícia a grandes incentivos, o aumento do IVA aplicado a equipamentos renováveis de 12% pra 23%,

bem como, as reduzidas tarifas bonificadas praticadas atualmente, tendem a desencorajar o investimento.

Sendo a temática do presente trabalho bastante atual e dada a importância do contexto em que surge, em seguida, sugere-se alguns trabalhos para desenvolvimento futuro, como por exemplo:

- Estudo de diferentes tipologias, épocas de construção e função dos edifícios referência;
- Comparação da influência da localização dos edifícios com a influência da data de construção, no que diz respeito aos níveis ótimos de rentabilidade;
- Estudo mais abrangentes no que diz respeito à seleção das medidas de eficiência energética e à compilação dos pacotes de medidas;
- Inclusão de diferentes sistemas de energias renováveis no edifício e de sistemas passivos;
- Estudo detalhado das taxas de desconto, da evolução dos custos de energia e dos fatores de conversão em energia primária a aplicar em Portugal;
- Estudo com auxílio de um *software* de simulação térmica dinâmica, permitindo assim, estudar com mais pormenor as consequências das diferentes medidas de eficiência energética a aplicar no edifício referência, bem como, estudar a influência da inércia térmica, que sendo um fator importante no desempenho térmico de um edifício, não foi considerado no presente documento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Comissão Europeia, “DIRECTIVA 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)”, *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 2010
- [2] EnerBuilding, “Eficiência energética nos edifícios residenciais”, *Deco*, Lisboa, 2008.
- [3] Comissão Europeia, “The EU climate and energy package” [Online]. Disponível em: http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm. [Acessado em: 21-Fev-2013], 2012.
- [4] Comissão Europeia, “Roteiro de transição para uma economia hipocarbónica competitiva em 2050”, Bruxelas, 2011.
- [5] “Resolução do Conselho de Ministros nº 20/2013”, *Diário da República*, 2013.
- [6] Comissão Europeia, “Regulamento Delegado (EU) Nº 244/2012 da Comissão de 16 de Janeiro que contempla a directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios, através do estabelecimento de um quadro metodológico comparativo po cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios e componentes de edifícios”, *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 2012.
- [7] Buildings Performance Institute Europe, “Europe’ s buildings under the microscope”, 2011.
- [8] Instituto Nacional de Estatística, “Censos 2011 - Resultados Provisórios”, Portugal, 2011.
- [9] Instituto Nacional de Estatística, “Censos 2011”, Portugal, 2012.
- [10] D. Silva Fernandes, “Estudo sobre a realidade da reabilitação de edifícios em Portugal, a bordagem térmico-energética”, Dissertação para obtenção de Grau Mestre em Engenharia Civil-Perfil de construção, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.

- [11] União Europeia, “Economizar 20% até 2020: a Comissão Europeia divulga o plano de acção para a eficiência energética,” [Online]. Disponível em: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-06-1434_pt.htm. [Acessado em: 22-Fev-2013], 2006.
- [12] “Decreto-Lei nº 40/90 de 6 de Abril – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios”, *Diário da República*, 1990.
- [13] Comissão Europeia, “DIRECTIVA 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios”, *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 2003.
- [14] “Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)”, *Diário da República*, 2006.
- [15] ADENE, “Perguntas & Respostas sobre o SCE”, Versão 1.2, 2009.
- [16] G. Verbeeck e H. Hens, “Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable?”, *Energy and Buildings*, 2005.
- [17] M. Almeida Miranda Silva, “Eficiência energética de um empreendimento multifamiliar”, Dissertação para obtenção de Grau Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 2008.
- [18] Gürkan Kumbaroglu e Reinhard Madlener, “Evaluation of economically optimal retrofit investment options for energy savings in buildings”, *Energy and Buildings*, 2012.
- [19] Yiannis Nikolaidis, Petros A. Pilavachi e Alexandros Chletsis, “Economic evaluation of nergy saving measures in a common type of Greek building” , *Applied Energy*, 2009.
- [20] José V. Ferreira e Idalina Domingos, “Assessment of Portuguese thermal building legislation in an energetic and environmental perspective”, *Energy and Buildings*, 2011.
- [21] A. R. Oliveira Gonçalves, “Exigências de desempenho energético segundo critérios de rentabilidade económica”, Dissertação para obtenção de Grau Mestre em Engenharia Civil na especialidade de construções, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2012.
- [22] ECOFYS, “Primary energy factors for electricity in buildings - Project number PSTRNL111077.” Utrecht, 2011.
-

- [23] Buildings Performance Institute Europe, “Implementing the cost-optimal methodology in EU countries”, 2013.
- [24] Eurostat, “Renewable energy - Analysis of the latest data on energy from renewable sources”, 2012.
- [25] República Portuguesa, “Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis ao Abrigo da Diretiva 2009/20/CE”, 2010.
- [26] Geoffrey P. Hammonda, Hassan A. Harajli, Craig I. Jones e Adrian B. Winnett a, “Whole systems appraisal of a UK Building Integrated Photovoltaic (BIPV) system: Energy, environmental, and economic evaluations”, *Energy Policy*, 2012
- [27] Suresh B. Sadineni, Todd M. France e Robert F. Boehm, “Economic feasibility of energy efficiency measures in residential buildings”, *Renewable Energy*, 2011.
- [28] R. S. Adhikari, N. Aste, C. Del Pero e M. Manfren, “Net Zero Energy Buildings: Expense or Investment?”, *Energy Procedia*, 2012.
- [29] Pedro. B. Andrade, “Eficiência Energética em Edifícios: Oportunidades e Desafios”, Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Energia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [30] Marta J. N. Oliveira Panão, Miguel P. Rebelo e Susana M.L. Camelo, “How low should be the energy required by a nearly Zero-Energy Building? The load/generation energy balance of Mediterranean housing”, *Energy and Buildings*, 2013
- [31] Comissão Europeia, “Orientações que acompanham o Regulamento Delegado (UE) nº244/2012 da Comissão, de 16 de janeiro de 2012, que complementa a Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios estabelecendo o quadro para uma metodologia comparativa para o cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios e das componentes de edifícios”, *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 2012.
- [32] Comissão Europeia, “DIRECTIVA 2006/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de Abril de 2006 relativa à eficiência na utilização final de energia e aos serviços energéticos e que revoga a Directiva 93/76/CEE do Conselho”, *Jornal Oficial das Comunidades Europeias* 2006.
-

- [33] “Documento de trabalho: Despacho RCCTE.01”, A publicar pela entidade supervisora do SCE responsável pela área da energia, 2013.
- [34] “Documento de trabalho: "Portaria Técnica, Anexo I - Requisitos de conceção para edifícios novos e intervenções - RCCTE” ,2013 .
- [35] IteCons, “Avaliação do Comportamento Térmico e Desempenho Energético dos Edifícios”, Documento de cálculo, Versão 15, 2013.
- [36] ECOFYS, “ECOFYS - Our story” [Online]. Disponível em: <http://www.ecofys.com/en/about/our-story/>. [Acessado em: 02-Mar-2013].
- [37] Instituto Nacional de Estatística, “Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico”, *Direcção Geral de Energia e Geologia*, 2010.
- [38] J. Ribeiro, “Exigências de desempenho energético segundo critérios de rentabilidade económica: caso de edifícios unifamiliares existentes anteriores a 1960” (em fase de submissão), Dissertação para obtenção de Grau Mestre em Engenharia Civil na especialidade de construções”, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2013.
- [39] Infopédia, “Ciclo de Carnot” [Online]. Disponível em: [http://www.infopedia.pt/\\$ciclo-de-carnot](http://www.infopedia.pt/$ciclo-de-carnot). [Acessado em: 13-Abr-2013].
- [40] SunProject, “Princípio de funcionamento da Bomba de calor”. [Online]. Disponível em: <http://www.sunproject.pt/bomba-de-calor/principio-de-funcionamento/>. [Acessado em: 13-Abr-2013].
- [41] “Portal Energia- Energias Renováveis”. [Online]. Disponível em: <http://www.portal-energia.com>. [Acessado em: 01-Mai-2013], 2009.
- [42] LNEG, “SolTerm 5”, Versão 5.1.4.
- [43] SMA Solar Technology, “Sunny Design”, Versão 2.30, 2012.
- [44] United States Department of Energy, “EnergyPlus Energy Simulation Software - Weather Data” [Online]. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal. [Acessado em: 15-Mai-2013], 2013.
-

- [45] DGEG, “Microprodução - Despacho DGEG de 2 Janeiro de 2013”, 2013.
- [46] Prestenergia, “O Que São Pellets? Vantagens dos Pellets.” Disponível em: [www.prestenergia.com/ficheiros/conteudos/files/pellets\(1\).pdf](http://www.prestenergia.com/ficheiros/conteudos/files/pellets(1).pdf)
- [47] Energia Biomassa, “Como funciona um Equipamento a Pellets - Energia Biomassa - Energias Renováveis em Portugal” [Online]. Disponível em: <http://energiabiomassa.com/energias-renovaveis/esquema-de-funcionamento-de-um-equipamento-a-pellets/>. [Acessado: 22-Abr-2013], 2009.
- [48] António Raimundo e Mário Coelho, “Cálculo da contribuição anual dos sistemas a biomassa para aquecimento de ar - Aquece a biomassa”, Versão 2.0, 2010.
- [49] “Documento de trabalho: Despacho Geral.02 - RCCTE,” vol. 02. A publicar pela entidade supervisora responsável pela área da Energia, 2012.
- [50] S. A. CYPE Ingenieros, “Gerador de preços para construção civil” [Online]. Disponível em: <http://www.geradordeprecos.info/>. [Acessado em: 12-Mar-2013], 2013.
- [51] Bloomberg L. P, “Portuguese Government Bonds 30YR Bond Portugal PL Analysis - GSPT30YR” [Offline]. Disponível em: <http://www.bloomberg.com/quote/GSPT30YR:IND>. [Acessado em: 11-Mar-2013].
- [52] Comissão Europeia, “EU energy trends to 2030 – Update 2009.”, 2009.
- [53] EuroStat, “Electricity and natural gas price statistics - Statistics Explained” [Online]. Disponível em: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Electricity_and_natural_gas_price_statistics. [Acessado em: 17-Mar-2013], 2013
- [54] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, “Portal ERSE” [Online]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/aerse/Paginas/default.aspx>. [Acessado em: 01-Mar-2013], 2013
- [55] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, “Composição dos Preços de Eletricidade , incluindo os Custos de Interesse Económico Geral”, 2012.
- [56] Comissão Europeia, “How to develop a Sustainable Energy Action Plan (SEAP) - Guidebook.”, 2010.
-