

**Otimização multiobjetivo para a promoção dos edifícios  
de balanço energético quase nulo em Portugal**

**Patrícia Cardoso Costa**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia e Gestão Industrial**

Orientadores: Prof. Carlos Augusto Santos Silva  
Prof. José Rui de Matos Figueira

**Júri**

Presidente: Prof. Paulo Vasconcelos Dias Correia  
Orientador: Prof. Carlos Augusto Santos Silva  
Vogal: Doutora Diana Pereira Neves

**Novembro 2016**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e por terem possibilitado que esta etapa da minha vida fosse concretizada.

Ao Professor Carlos Augusto Santos Silva, por toda a disponibilidade para a orientação deste trabalho e, essencialmente, pela constante tranquilidade e otimismo transmitidos – fatores determinantes para o sucesso desta dissertação.

Ao Professor José Rui de Matos Figueira, pela constante preocupação e dedicação que me impeliu a avançar cada vez mais com o desenvolvimento da dissertação.

À Cláudia Monteiro e ao Rui Ximenes, pela ajuda e disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas que foram surgindo.

A todos os meus amigos e familiares que me foram acompanhando ao longo da minha vida académica, em especial no período relativo à elaboração desta dissertação, pelo carinho e confiança que sempre me transmitiram.

Ao grupo AdP - Águas de Portugal, pela sua iniciativa de atribuição de bolsas de estudo que me concedeu o apoio financeiro para a concretização do meu percurso académico.

A todos, o meu sincero obrigado!

## RESUMO

A promoção de edifícios de balanço energético quase nulo (nZEB) tornou-se imperativa para os países da União Europeia desde a reformulação, em 2010, da diretiva para o desempenho energético dos edifícios.

Assim, a Diretiva 2010/31/UE impõe que, mais tardar em 2020, os edifícios novos, ou sujeitos a grande intervenção, sejam edifícios com necessidades energéticas reduzidas, sendo essas necessidades residuais satisfeitas, em grande parte, por energia renovável. Como tal, os Estados-Membros são obrigados a definir a sua meta nZEB. Isto requer que sejam estabelecidos requisitos mínimos para o desempenho energético dos edifícios, segundo uma lógica custo-ótimo.

Deste modo, a presente dissertação propõe a aplicação de um modelo de otimização multiobjetivo para a seleção de medidas que possam ser postas em prática no momento da construção ou reabilitação de edifícios. Desta forma, serão preferidas as medidas que visem a minimização do balanço energético do edifício, medido em energia primária e que, ao mesmo tempo, apresentem um custo de ciclo de vida reduzido.

A partir da aplicação do modelo a uma habitação de referência e da análise dos resultados, foi possível concluir que um indicador numérico para o balanço energético de  $29,58 \text{ kWh}_{ep}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$  é adequado para um edifício residencial, médio, situado em Lisboa e sujeito a obras de grande intervenção. Ainda, para o mesmo edifício, a quota-parte de renováveis deverá ser no mínimo igual a 48,5%.

Para além disso, observou-se que para a redução do balanço energético, é fundamental o aproveitamento da energia solar através da utilização de painéis solares térmicos e fotovoltaicos.

**Palavras-chave:** Diretiva 2010/31/UE, edifícios de balanço energético quase nulo, otimização multiobjetivo

## ABSTRACT

The promotion of nearly zero-energy buildings (nZEB) became mandatory for the European Union since the recast of the Energy Performance of Buildings Directive, occurred on 2010.

Thus, Directive 2010/31/EU requires that, by 31 December 2020, all new buildings, or buildings undergoing major renovation, are buildings with reduced energy needs. The very low amount of energy required should be largely covered by energy from renewable sources. Moreover, Member States are required to set their own nZEB goal, establishing minimum requirements for the energy performance of buildings, which had achieved cost-optimal levels.

Therefore, this thesis proposes the application of a multi-objective optimization model for the selection of measures that can be put in place at the time of construction or rehabilitation of buildings. Hence, the optimal measures will minimize the energy balance of the building, measured in primary energy, and at the same time represent a low life-cycle cost.

From the application of the model to a reference dwelling and the analysis of its results, it was concluded that a numerical indicator for the energy balance of  $29,58 \text{ kWh}_{ep}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$  is suitable for an average residential building located in Lisbon and subject to major intervention works. Still, for the same building, the share of renewables should be at least equal to 48.5%.

In addition, it was concluded that the exploitation of solar energy through the use of solar thermal and photovoltaic panels is critical for reducing the energy balance.

**Key-words:** Energy Performance of Buildings Directive Recast, Nearly-zero Energy Buildings, Multi-objective Optimization

# Índice

Índice de Figuras .....	VIII
Índice de Tabelas .....	IX
Lista de Acrónimos .....	XI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivos da dissertação .....	1
1.3 Metodologia .....	2
1.4 Estrutura da dissertação.....	3
2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	4
2.1 Edifícios de balanço energético nulo.....	4
2.2 Estratégia energética da União Europeia para os edifícios .....	6
2.2.1 Diretiva 2010/31/UE para o Desempenho Energético de Edifícios.....	7
2.2.2 Implementação da Diretiva 2010/31/UE.....	10
2.2.3 Diretiva 2012/27/UE para a Eficiência Energética dos Edifícios.....	13
2.3 Reabilitação de edifícios.....	14
2.4 Situação energética em Portugal .....	15
2.4.1 Consumos no setor residencial .....	15
2.4.2 Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação.....	18
2.4.3 Certificação energética.....	18
2.4.4 Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética .....	19
2.5 Promoção de medidas de eficiência energética na reabilitação de edifícios em Portugal	20
2.6 Conclusões do Capítulo .....	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
3.1 Introdução.....	23
3.2 Otimização Multiobjetivo para NZEB.....	24
3.2.1 Análise e comparação do estado da arte.....	24
3.2.2 Abordagem aos custos.....	28
3.3 Conclusões do capítulo .....	29
4. MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO.....	30
4.1 Formulação do modelo.....	30

4.1.1	Variáveis de decisão .....	30
4.1.2	Restrições .....	31
4.1.3	Funções-objetivo .....	38
4.2	Metodologia de aplicação do modelo .....	40
4.3	Conclusões do Capítulo .....	41
5.	CASO DE ESTUDO .....	42
5.1	Definição do edifício de referência .....	42
5.1.1	Outros parâmetros característicos do edifício de referência.....	43
5.2	Parâmetros para o modelo .....	45
5.2.1	Preços da energia.....	45
5.2.2	Parâmetros característicos dos mecanismos de preparação de AQS, aquecimento e arrefecimento de espaço .....	45
5.2.3	Parâmetros característicos dos materiais das janelas .....	47
5.2.4	Parâmetros característicos dos mecanismos de sombreamento .....	48
5.2.5	Parâmetros característicos dos materiais de isolamento.....	49
5.2.6	Parâmetros característicos do mecanismo de produção de energia .....	50
5.3	Necessidades energéticas da habitação de referência .....	50
5.4	Aplicação do modelo de otimização .....	51
5.4.1	Algoritmo genético .....	51
5.5	Análise de resultados .....	53
5.5.1	Análise das soluções não-dominadas .....	53
5.6	Análise de sensibilidade .....	56
5.6.1	Balanco energético avaliado em energia final.....	56
5.6.2	Satisfação das necessidades energéticas de arrefecimento do espaço .....	59
5.6.3	Cumprimento dos valores limite para as necessidades nominais anuais de energia útil definidos pela legislação .....	61
5.6.4	Painel solar fotovoltaico a produzir para autoconsumo.....	65
5.7	Recomendações.....	68
5.8	Conclusões do capítulo .....	68
6.	CONCLUSÕES .....	70
6.1	Trabalho futuro .....	71

REFERÊNCIAS E OUTRA BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	793
LEGISLAÇÃO.....	77
ANEXOS.....	79
Anexo A – Variáveis de decisão do modelo de otimização .....	79
Anexo B – Determinação do edifício de referência a partir da análise dos Censos.....	81
Anexo C – Código para a execução do modelo em MATLAB.....	83

# Índice de Figuras

Figura 1.1 - Etapas da metodologia a ser seguida na dissertação de mestrado.....	2
Figura 2.1 - Esquema dos aspetos a ter em conta na definição de um projeto NZEB.....	4
Figura 2.2 - Gráfico que representa o conceito de NZEB.....	6
Figura 2.3 - Quadro metodológico de otimização da rentabilidade definido no Regulamento Delegado 244/2012.....	8
Figura 2.4 - Exemplo de curva de custo e respetivo ponto de custo ótimo.....	9
Figura 2.5 - Estado do progresso da implementação da definição nZEB para novos edifícios na UE.....	10
Figura 2.6 - Estado do progresso da definição dos requisitos de quota-parte de energias renováveis na UE.....	11
Figura 2.7 - Principais políticas e medidas adotadas pelos Estados-Membros para fomentar novos nZEB.....	13
Figura 2.8 - Distribuição do consumo de energia final por sector, 2009.....	15
Figura 2.9 - Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de fonte - Portugal, 2010.....	16
Figura 2.10 - Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de utilização - Portugal.....	17
Figura 4.1 - Metodologia para a aplicação do modelo de otimização multiobjetivo.....	40
Figura 5.1 - Gráfico representativo das necessidades energéticas anuais para a habitação de referência.....	50
Figura 5.2 - Representação do genoma do indivíduo $n$ - adaptado de Eilhauer, 2015.....	51
Figura 5.3 - Esquematização dos procedimentos que ocorrem quando da execução do algoritmo genético – adaptado de Eilhauer, 2015.....	52
Figura 5.4 - Conjunto de soluções encontradas com a execução do modelo.....	53
Figura 5.5 - Conjunto de soluções encontradas com a execução do modelo quando o balanço energético é avaliado em termos de energia final.....	57
Figura 5.6 - Resultados obtidos da execução do modelo com a obrigatoriedade da satisfação das necessidades energéticas de arrefecimento de espaço.....	59
Figura 5.7 - Resultados obtidos da execução do modelo quando é requerido o cumprimento dos valores limite para as necessidades nominais anuais de energia útil definidos pela legislação.....	62
Figura 5.8 - Resultados obtidos da execução do modelo com limitação do painel solar fotovoltaico a produzir para autoconsumo.....	65

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Quadro-Resumo da definição do indicador numérico para a energia primária em edifícios nZEB nos diferentes Estados-Membros.....	12
Tabela 2.2 - Caracterização do parque habitacional por ano de construção - Portugal, 2010.....	15
Tabela 2.3 - Consumo de energia (tep) no alojamento por tipo de energia e tipo de utilização - Portugal, 2010.....	17
Tabela 2.4 - Classes energéticas segundo o desempenho energético do edifício residencial .....	19
Tabela 3.1 - Síntese da revisão ao estado da arte para aplicação de modelos de otimização multiobjetivo.....	25
Tabela 4.1 - Conjunto de variáveis de decisão do modelo de otimização multiobjetivo.....	31
Tabela 5.1 - Características do edifício de referência localizado no município de Lisboa. ....	42
Tabela 5.2 - Características do alojamento e respetivos parâmetros para a aplicação do modelo. ....	43
Tabela 5.3 - Parâmetros característicos do edifício de referência.....	43
Tabela 5.4 - Parâmetros característicos do edifício de referência (continuação).....	44
Tabela 5.5 - Preço atual de cada vetor energético em €/kWh. ....	45
Tabela 5.6 - Parâmetros relativos aos mecanismos de preparação de AQS. ....	46
Tabela 5.7 - Parâmetros relativos aos mecanismos de aquecimento de espaço.....	46
Tabela 5.8 - Parâmetros relativos ao mecanismo de arrefecimento de espaço.....	46
Tabela 5.9 - Parâmetros relativos aos materiais das janelas. ....	47
Tabela 5.10 - Parâmetros relativos aos materiais das janelas (continuação). ....	48
Tabela 5.11 - Parâmetros relativos aos mecanismos de sombreamento.....	48
Tabela 5.12 - Parâmetros relativos aos materiais de isolamento. ....	49
Tabela 5.13 - Parâmetros relativos ao mecanismo de produção de energia. ....	50
Tabela 5.14 - Caracterização das soluções não-dominadas. ....	54
Tabela 5.15 - Continuação da caracterização das soluções não-dominadas. ....	54
Tabela 5.16 - Caracterização da solução não-dominada devolvida pela execução do modelo quando o balanço energético é avaliado em termos de energia final.....	58
Tabela 5.17 - Continuação da caracterização da solução não-dominada devolvida pela execução do modelo quando o balanço energético é avaliado em termos de energia final.....	58
Tabela 5.18 - Caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando é requerida a satisfação das necessidades de arrefecimento. ....	60
Tabela 5.19 - Continuação da caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando é requerida a satisfação das necessidades de arrefecimento. ....	60
Tabela 5.20 - Relação entre os valores das necessidades nominais e limite, de energia útil para aquecimento e arrefecimento de edifícios sujeitos a grandes intervenções – adaptado da Portaria nº349/B-2013.....	62
Tabela 5.21 - Caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando é requerido o cumprimento da legislação para o valor limite das necessidades nominais anuais de energia útil para o aquecimento e arrefecimento do espaço. ....	63

Tabela 5.22 - Continuação da caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando é requerido o cumprimento da legislação para o valor limite das necessidades nominais anuais de energia útil para o aquecimento e arrefecimento do espaço. ....	63
Tabela 5.23 - Caracterização das soluções aquando do redimensionamento do painel solar fotovoltaico. ....	64
Tabela 5.24 - Caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando o painel solar fotovoltaico produz apenas para autoconsumo. ....	66
Tabela 5.25 - Continuação da caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando o painel solar fotovoltaico produz apenas para autoconsumo. ....	66

## Lista de Acrónimos

Art. – Artigo

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

AQS – Águas Quentes Sanitárias

ANN – *Artificial Neural Network*

CCE – Comissão das Comunidades Europeias

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

Dir. – Diretiva

DL – Decreto-Lei

DE – *Differential Evolution*

EED – *Energy Efficiency Directive*

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*

INE – Instituto Nacional de Estatística

LCC – *Life Cycle Cost*

LCOT – *Levelized Cost of Technology*

MILP – *Mixed-Integer Linear Programming*

MOO – *Multi-objective Optimization*

NSGA – *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*

nZEB – *Nearly Zero Energy Buildings*

NZEB – *Net Zero Energy Buildings*

PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

PSO – *Particle Swarm Optimization*

RD – Regulamento Delegado

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RES – *Renewable Energy System*

SCE – Sistema de Certificação Energética

TB – *Thermal Break*

UE – União Europeia

VAL – Valor Atual Líquido

VD – Variável de decisão

# 1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a motivação para o tema desenvolvido na presente dissertação, assim como os objetivos a alcançar com o estudo do tema. Ainda é descrita a metodologia escolhida para abordar o problema e a estrutura do presente documento.

## 1.1 Motivação

Atualmente, os edifícios representam 40% da energia total consumida nos países da União Europeia. Com a expansão verificada neste setor, será de esperar um aumento no consumo energético. Como tal, a promoção da eficiência energética através da redução do consumo de energia e da utilização de energia proveniente de fontes renováveis constitui uma medida essencial para reduzir a dependência energética da União Europeia (UE) e as emissões de gases com efeito de estufa (Dir 2010/31/UE). Neste sentido, a Comissão Europeia elaborou a Diretiva 2010/31/UE como meta geral a ser alcançada pelos Estados-Membros. Assim, esta define que todos os imóveis novos ou sujeitos a grandes intervenções de reconstrução terão de ser edifícios de balanço energético quase nulo a partir de 2018, no caso de edifícios detidos por autoridades públicas e, o mais tardar em 2020, no caso de edifícios privados.

Uma vez aprovada a Diretiva, cabe a cada país desenvolver a sua própria legislação para cumprir o objetivo por ela decretado. Deste modo, os Estados-Membros transpõem a Diretiva estabelecendo requisitos mínimos para o desempenho energético dos edifícios. Tais requisitos deverão ser definidos tendo por base uma lógica de custo-benefício, procurando alcançar um equilíbrio ótimo em termos de rentabilidade entre os investimentos realizados e os custos de energia economizados ao longo do ciclo de vida do edifício. Por conseguinte, transpor e implementar esta Diretiva revela-se um verdadeiro desafio para os Estados-Membros que, dentro da sua definição de edifícios com necessidades quase nulas de energia, devem referir a quantidade de energia que cada edifício poderá consumir, que fontes renováveis são permitidas e qual a proximidade ao edifício a que a energia deve ser gerada, tendo por base os recursos disponíveis, as limitações e as características climáticas de cada país.

Em Portugal, a transposição desta Diretiva ainda se encontra em fase de planeamento, estando apenas definido o conceito de “edifícios com necessidades quase nulas de energia” (disponível no Artigo 16º do Decreto-Lei nº 118/2013) e faltando fixar indicadores numéricos para a procura de energia e para a percentagem que deve ser coberta por energia proveniente de fontes renováveis (Ecofys, 2014).

## 1.2 Objetivos da dissertação

Com o desenvolvimento desta dissertação pretende-se, em primeiro lugar, explorar as temáticas relevantes para a construção de um modelo de otimização multiobjetivo com vista à promoção de edifícios de balanço energético quase nulo em Portugal. Posteriormente, a aplicação deste modelo e a análise dos seus resultados servirão de base para apoiar a decisão do governo português aquando da

transposição dos requisitos impostos pela Diretiva 2010/31/UE para a legislação nacional – objetivo este que motiva a realização do presente trabalho de investigação. Deste modo, os principais objetivos desta dissertação são as seguintes:

- Compreender o conceito de edifícios com necessidades nulas de energia e outros similares;
- Enquadrar a evolução da estratégia energética da União Europeia e o trabalho que os seus Estados-Membros têm vindo a desenvolver no sentido de estabelecer os requisitos mínimos para a promoção de edifícios de balanço energético quase nulo;
- Analisar a realidade energética de Portugal, em particular no setor residencial;
- Avaliar o estado da arte no que concerne a modelos de otimização para edifícios de balanço energético quase nulo;
- Desenvolver um modelo de otimização multiobjectivo para o problema em análise;
- Aplicar o modelo de otimização a um caso de estudo e analisar os seus resultados, com vista a retirar recomendações para a implementação da Diretiva 2010/31/UE em Portugal.

### 1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento da presente dissertação de mestrado será seguida a metodologia representada pelo esquema da Figura 1.1.

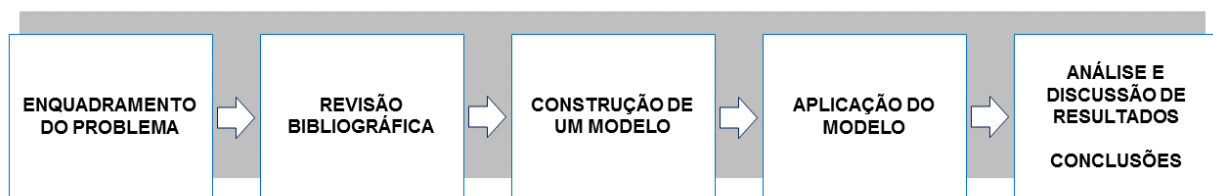


Figura 1.1 - Etapas da metodologia a ser seguida na dissertação de mestrado.

Mais concretamente, este processo de realização da dissertação resume-se em cinco etapas sequenciais:

- **Enquadramento do Problema:** Nesta primeira etapa, será feita uma contextualização teórica do problema, através da abordagem de temas relevantes para a compreensão e definição do mesmo.
- **Revisão Bibliográfica:** A segunda etapa consiste na revisão do estado da arte com o objetivo de construir uma base científica e fundamentada para a posterior criação de um modelo.
- **Construção de um modelo:** Esta constitui a terceira etapa da metodologia, na qual se desenvolverá a dissertação de mestrado. Nesta fase será criado o modelo de otimização multiobjetivo para a promoção de edifícios de balanço energético quase nulo.
- **Aplicação do modelo:** Na quarta etapa pretende-se aplicar o modelo a um caso de estudo, pertinente para uma adequada sustentação da proposta que será efetuada para o apoio à decisão da transposição dos requisitos determinados pela Diretiva 2010/31/UE para a legislação portuguesa.

- **Análise e discussão de resultados e conclusões:** Por fim, na quinta etapa, serão analisados e discutidos os resultados obtidos da aplicação do modelo. Será, então, a partir desta análise que se irão retirar as conclusões para a realização da proposta anteriormente referida bem como outras recomendações.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, incluindo-se neste número o capítulo atual. Os restantes capítulos são seguidamente contextualizados:

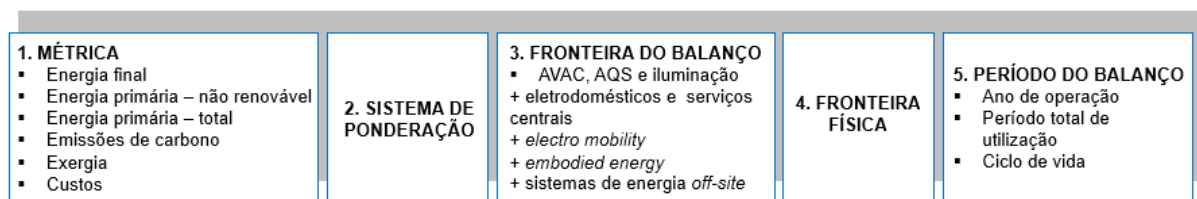
- **Capítulo 2** – No segundo capítulo será definido o problema em análise. Assim, será feita uma investigação acerca de temas relevantes para o desenvolvimento do projeto, entre eles: o conceito de edifício de balanço energético nulo e quase nulo; a estratégia energética da União Europeia através do lançamento da Diretiva 2010/31/UE para o Desempenho Energético dos Edifícios e da Diretiva 2012/27/UE para a Eficiência Energética dos Edifícios; a reabilitação de edifícios e a situação energética de Portugal.
- **Capítulo 3** – No terceiro capítulo será apresentada a revisão bibliográfica referente a temáticas relacionadas com a otimização aplicada a edifícios de balanço energético nulo ou quase nulo, analisando os modelos e métodos utilizados e os casos de estudo aos quais foram aplicados.
- **Capítulo 4** – No quarto capítulo será descrito o modelo de otimização multiobjetivo a utilizar para a resolução do problema.
- **Capítulo 5** – No quinto capítulo será exposto o caso de estudo ao qual se aplicará o modelo definido no anterior capítulo. Além disso, serão também analisados os resultados obtidos a partir da execução do modelo.
- **Capítulo 6** – No sexto capítulo, o último, serão apresentadas as conclusões da dissertação e as orientações para trabalho futuro.

## 2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

No presente capítulo é primeiramente analisado o conceito de edifícios de balanço energético nulo. Depois, é descrita a estratégia energética para os edifícios assumida pela União Europeia, sendo exploradas as Diretivas 2010/31/UE e 2012/27/UE e a sua respetiva implementação. É também avaliada a importância da reabilitação urbana e a situação energética de Portugal, considerando os consumos energéticos no setor residencial e os mecanismos que a legislação portuguesa utiliza para regular as necessidades energéticas dos edifícios: o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação; o Sistema de Certificação Energética e o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética. Por fim, é exposta a necessidade de promoção de medidas de eficiência energética na reabilitação de edifícios.

### 2.1 Edifícios de balanço energético nulo

O conceito de edifício de balanço energético nulo (em inglês *Net Zero Energy Building – NZEB*) surgiu pela primeira vez em 2007 numa lei dos Estados Unidos da América relativa a edifícios comerciais. Esta lei fixava que, a partir de 2030, estes edifícios deveriam ser “*zero-net-energy commercial buildings*” - edifícios comerciais com balanço de energia nulo - ou seja, edifícios com alto desempenho, concebidos, construídos e operados de forma a apresentar um consumo de energia reduzido, cujas necessidades energéticas residuais fossem cobertas através de fontes de energia que não produzam gases de efeito de estufa e, por fim, que alcançassem estes objetivos sendo economicamente viáveis (Mlecnik, 2012). Desde então, este conceito foi sendo utilizado com maior frequência, deixando, cada vez mais, de ser considerado um objetivo para um futuro remoto, mas antes, uma solução realista para a redução da emissão de CO<sub>2</sub> e do uso de energia no setor doméstico, ao nível dos edifícios (Marszal *et al.*, 2011). No entanto, estas amplas definições deixam espaço para várias interpretações. Assim, dependendo das fronteiras e métricas consideradas, diferentes serão as metas e estratégias para conceber um projeto que se enquadre num NZEB - uma vez que terá de se adequar o método de cálculo a aplicar (Crawley *et al.*, 2009).



**Figura 2.1** - Esquema dos aspetos a ter em conta na definição de um projeto NZEB, adaptado de Voss *et al.*, 2011.

A Figura 2.1 mostra os aspetos que deverão ser fixados para delimitar o conceito de NZEB. Primeiramente, a métrica representa a unidade aplicada para o cálculo do balanço. Como tal, consoante a unidade selecionada, diferentes serão os resultados. Desta forma, a métrica pode ser a energia final; a energia primária; a emissão de CO<sub>2</sub> equivalente; os custos; a exergia ou outros parâmetros definidos pela política energética de cada país (Marszal *et al.*, 2011). Em segundo lugar, é necessário um sistema de ponderação que converta a unidade física na métrica pretendida (Sartori *et al.*, 2012). Adicionalmente, há que definir a fronteira a que se aplicará o balanço, ou seja, que consumos de

energia serão considerados. Normalmente, é usada a energia operacional, o que inclui energia para o aquecimento, arrefecimento e ventilação (sistemas AVAC), águas quentes sanitárias (AQS) e iluminação fixa, mas podem ser usadas diferentes combinações incluindo, por exemplo, a energia embebida (*embodied energy*) do edifício (Sartori *et al.*, 2012). Para além desta, a fronteira física demarca a interface entre o edifício e a rede de energia, facilitando a diferenciação do que é considerado no local (*on-site*) e fora do mesmo (*off-site*) (Voss *et al.*, 2012). Em conjunto, a fronteira física e a do balanço, delimitam a fronteira do sistema. Por fim, estabelece-se o período de tempo sobre o qual se procederá ao cálculo do balanço. Este pode ser feito na base do ano de operação; considerando todo o ciclo de vida do edifício ou noutras bases mensais ou sazonais, por exemplo (Marszal *et al.*, 2011).

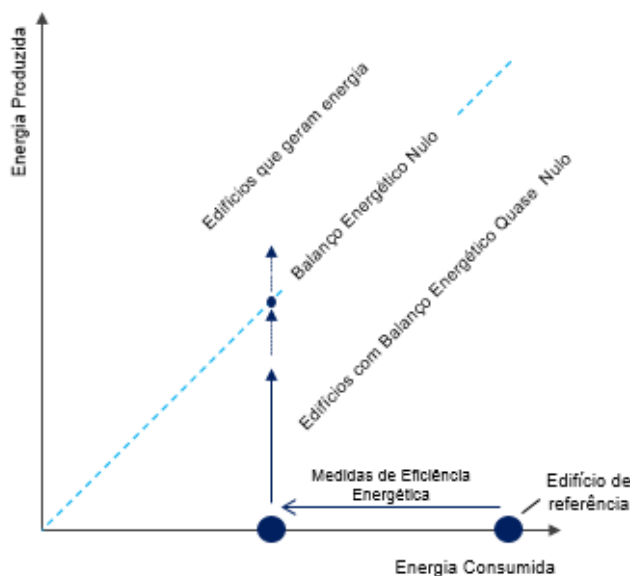
Como resultado da combinação de diferentes métricas e fronteiras do sistema, surgem várias possíveis definições para o conceito de NZEB. Torcelinni *et al.* (2006), sintetiza-las em quatro diferentes abordagens: *Net Zero Site Energy* (balanço energético nulo avaliado no local); *Net Zero Source Energy* (balanço energético nulo avaliado na fonte); *Net Zero Energy Costs* (balanço energético nulo ao nível dos custos) e *Net Zero Energy Emissions* (balanço energético nulo ao nível das emissões).

- *Net Zero Site Energy*: Produz, pelo menos, a quantidade de energia que consome ao longo do ano. Esta é contabilizada localmente - *Site*.
- *Net Zero Source Energy*: Produz, pelo menos, a quantidade de energia que consome ao longo do ano. Esta é contabilizada a partir da fonte, com base na energia primária utilizada para gerar e transmitir a energia ao edifício. Para este balanço, é necessário aplicar fatores de conversão *site-to-source*, para que se tenha em conta as perdas energéticas devidas à geração e transmissão.
- *Net Zero Energy Costs*: O valor monetário obtido pela venda da energia elétrica à rede (por parte do proprietário do edifício) é no mínimo o mesmo que o proprietário gasta ao utilizar energia da rede ao longo do ano.
- *Net Zero Energy Emissions*: Produz, a partir de fontes de energia renováveis não poluentes, a mesma quantidade de energia que consome ao longo do ano produzida a partir de fontes energéticas convencionais que emitem CO<sub>2</sub>.

Importa mencionar que, para a formulação destas abordagens, Torcelinni *et al.* (2006) considera que o edifício está conectado à rede energética, para que seja possível exportar o excesso de energia produzida.

Apesar das várias abordagens desenvolvidas para o conceito de NZEB, não há uma que se considere a melhor. Contudo, transversalmente a todas as classificações, há uma regra de conceção comum: primeiro tratar de diminuir as necessidades ao nível da procura e só depois compensá-las com a oferta (Crawley *et al.*, 2009). Assim, Voss *et al.* (2012) vem, de forma genérica, explicitar a avaliação do balanço energético, através do gráfico da Figura 2.2. Neste gráfico, o denominado edifício de referência representa um edifício novo, construído com o objetivo de cumprir os requisitos mínimos impostos pela respetiva legislação. Este edifício é o ponto de partida para alcançar a meta NZEB. No eixo das abcissas do gráfico é representada a procura atual do edifício. Esta é, primeiramente,

minimizada através da aplicação de medidas de eficiência energética, tais como, a melhoria do isolamento em áreas de janelas ou fachadas, ou a substituição de eletrodomésticos por outros com maior eficiência. Por outro lado, a geração de energia renovável - eixo das ordenadas do gráfico referido – vem compensar as necessidades energéticas do edifício. Consequentemente, se a geração de energia compensar totalmente as necessidades energéticas, o edifício tem um balanço energético nulo (NZEB). Pelo contrário, se apenas compensar parcialmente as necessidades o edifício tem um balanço energético quase nulo (*nearly zero energy building - nZEB*). Finalmente, se gerar mais energia do que a que consome, então é um edifício que gera energia (*plus energy building*).



**Figura 2.2** - Gráfico que representa o conceito de NZEB, adaptado de: Voss *et al.*,2012.

Mais recentemente, em 2010, o conceito de balanço energético foi explorado pela União Europeia na reformulação da Diretiva para o Desempenho Energético dos Edifícios (Diretiva 2010/31/UE), tendo sido traduzido para Portugal no Decreto-Lei nº 118/2013. No entanto, em vez de estabelecer uma meta NZEB, é sugerido que os edifícios tenham balanços energéticos quase nulos (nZEB), tendo um elevado desempenho energético, em que a satisfação das necessidades de energia resulte em grande medida de energia proveniente de fontes renováveis, designadamente a produzida no local ou nas proximidades (Art. 2º Dir 2010/31/UE).

## 2.2 Estratégia energética da União Europeia para os edifícios

Em 2014, a União Europeia reforçou as metas climáticas e energéticas que tinha estabelecido para o ano 2020 - conhecidas como “objetivo 20:20:20” - através da criação do “quadro para a energia e clima 2030”. Este último remete para que, chegando a 2030, pelo menos 27% da energia consumida na UE seja de origem renovável; exista uma redução de, no mínimo, 40% da emissão de gases com efeito de estufa (em relação aos níveis obtidos em 1990) e uma melhoria na eficiência energética de, pelo menos, 27% (<http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy/2030-energy-strategy>). Deste modo, a UE tem vindo a tomar várias ações em diferentes áreas para que estas metas - e, consequentemente, também as que já haviam sido definidas para o ano de 2020 - sejam atingidas.

Uma das áreas mais determinante para o sucesso da estratégia energética da UE é o setor dos edifícios que, por si só, representa 40% da energia primária consumida no total dos Estados-Membros (Dir 2010/31/UE). Desta forma, é imperativa a renovação do edificado existente e a construção de novos edifícios cumprindo rigorosos requisitos de eficiência energética (Serghides *et al.*, 2015). Para tal, a UE lançou duas diretivas-chave para a redução do consumo energético nos edifícios: a Diretiva 2010/31/UE relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios e a Diretiva 2012/27/UE referente às normas de eficiência energética dos mesmos, que serão detalhadas nas próximas subsecções.

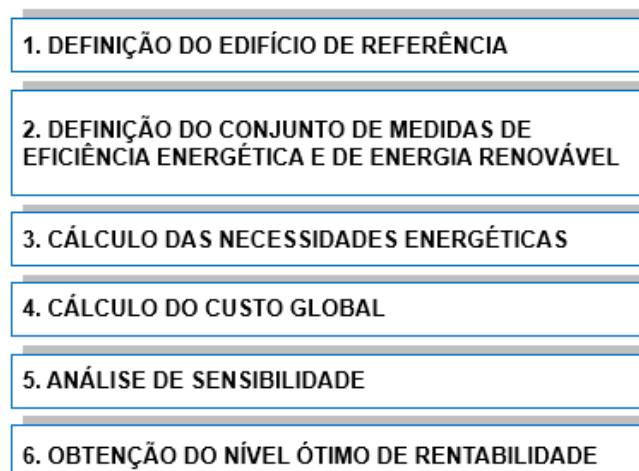
### **2.2.1 Diretiva 2010/31/UE para o Desempenho Energético de Edifícios**

A Diretiva 2010/31/UE, veio reformular a já existente Diretiva para o Desempenho Energético dos Edifícios (*Energy Performance of Buildings Directive – EPBD*) lançada em 2002. Assim, a EPBD reformulada define como objetivo para a UE que, o mais tardar em 31 de dezembro de 2020, todos os edifícios novos sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia (nZEB) ou, o mais tardar em 31 de dezembro de 2018 no caso de edifícios novos ocupados e detidos por autoridades públicas. Além disso, refere que os Estados-Membros devem desenvolver políticas e tomar medidas como o estabelecimento de objetivos, para incentivar a transformação de todos os edifícios remodelados (cujos respetivos elementos construtivos da envolvente provoquem um impacto significativo no desempenho energético), também em edifícios com necessidades quase nulas de energia de energia (Art. 9º Dir 2010/31/UE).

Como referido na secção 2.1, um nZEB é descrito no Artigo 2º da EPBD reformulada como um edifício com um desempenho energético muito elevado. As necessidades de energia residuais deverão ser compensadas maioritariamente por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades. Nesta definição de edifício de balanço energético quase nulo, a métrica a utilizar para avaliar as necessidades energéticas é a energia primária, isto é, o balanço energético é contabilizado na fonte e por isso, a energia (quer seja consumida ou produzida) é multiplicada por fatores de conversão de energia primária estabelecidos a nível nacional.

Para além de estabelecer a meta nZEB, a Diretiva 2010/31/UE impele os Estados-Membros a definir requisitos mínimos de desempenho energético a fim de alcançar níveis ótimos de rentabilidade (Art. 4º Dir 2010/31/UE). A promoção da melhoria do desempenho energético dos edifícios pela EPBD, procura ter em conta “as condições climáticas externas e condições locais, bem como as exigências em matéria de clima interior e de rentabilidade” (Art. 1º Dir 2010/31/UE). Este desempenho energético dos edifícios é avaliado pela energia necessária para satisfazer as necessidades energéticas associadas à utilização típica do edifício, nomeadamente: a energia utilizada para o aquecimento, o arrefecimento, a ventilação (sistemas AVAC); a preparação de águas quentes sanitárias (AQS) e a iluminação fixa (Art. 2º, Dir 2010/31/UE). Complementando o referido no Artigo 4º da Diretiva 2010/31/UE, o Regulamento Delegado (UE) nº 244/2012 estabelece um quadro metodológico que “especifica as regras para a comparação de medidas de eficiência energética, de medidas que recorrem a fontes de energia renováveis e de conjuntos e variantes dessas medidas, com base no desempenho energético primário e no custo atribuído à sua implementação”, (Art. 1º RD 244/2012) através do cálculo dos níveis ótimos

de rentabilidade dos requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios, conforme esquematizado na Figura 2.3.



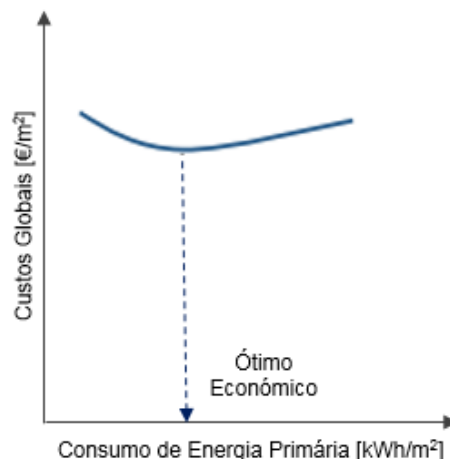
**Figura 2.3** - Quadro metodológico de otimização da rentabilidade definido no Regulamento Delegado 244/2012.

A Figura 2.3 remete para a metodologia que apoia a identificação dos requisitos mínimos de desempenho energético segundo uma lógica de custo-benefício:

- **1. Definir o edifício de referência** – Toma-se como edifício de referência um que seja representativo da funcionalidade e da localização geográfica, incluindo condições climáticas interiores e exteriores.
- **2. Definir um conjunto de medidas de eficiência energética e de energia renovável** – Estabelecem-se medidas, ou conjunto de medidas, de eficiência energética e/ou baseadas em fontes de energia renovável para serem avaliadas relativamente aos edifícios de referência. Estas podem ser para um edifício no seu todo, para componentes individuais ou para uma combinação de componentes. As medidas de eficiência energética podem ser definidas tanto num âmbito prescritivo como num âmbito relativo ao desempenho, ou a combinação de ambos. Requisitos prescritivos referem-se a características da envolvente do edifício (como o Coeficiente de Transmissão Térmica (U) de paredes e janelas), ou de sistemas AVAC (como o Coeficiente de Performance (COP) de bombas de calor). Por outro lado, os requisitos relativos ao desempenho referem-se às necessidades energéticas para, por exemplo, aquecimento, arrefecimento e iluminação ou, em termos totais, de energia primária (Sartori *et al.*, 2012).
- **3. Calcular as necessidades energéticas** – A partir das medidas/conjunto de medidas determinadas no passo anterior, é efetuado o cálculo do desempenho energético das mesmas, relativamente à área de pavimento definida a nível nacional e das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento. Também neste passo, calcula-se a energia fornecida para fins de aquecimento, arrefecimento, ventilação, água quente para uso doméstico e sistemas de iluminação. Ambos os cálculos são feitos para uma base anual e devem ser convertidos para o respetivo valor em termos de energia primária.
- **4. Calcular o Custo Global** – Para as medidas definidas anteriormente, é determinado o seu custo (isto é, o valor atual líquido) durante o ciclo de vida económico previsto, uma vez aplicadas aos edifícios de referência. Considera-se um período de cálculo de 30 anos para os

edifícios residenciais e públicos e um período de cálculo de 20 anos para os edifícios comerciais e não-residenciais. Este cálculo inclui as seguintes categorias de custos: custos iniciais de investimento; custos de utilização (ou receitas no caso de ser uma medida de produção de energia); custos de energia (tendo em conta as previsões para a evolução dos mesmos) e custos de eliminação - se pertinente. Se o cálculo for efetuado numa perspetiva macroeconómica, são ainda considerados os custos das emissões de gases com efeito de estufa.

- **5. Analisar a Sensibilidade** – Com o objetivo de avaliar incertezas, neste passo são identificados os parâmetros mais importantes de um cálculo de otimização de rentabilidade. Assim, deverá ser feita uma análise de sensibilidade à taxa de e aos cenários de evolução do preço da energia e outros dados sensíveis a utilizar.
- **6. Obter o nível ótimo de rentabilidade** - Finalmente, uma vez calculados os custos das medidas de eficiência energética durante o ciclo de vida económico previsto, é avaliada a rentabilidade dos diversos níveis de requisitos mínimos de desempenho energético. Desta forma, é possível determinar os níveis ótimos de rentabilidade para os requisitos de desempenho energético. Assim, para cada edifício de referência, são comparados os custos globais obtidos para várias medidas de eficiência energética construindo uma curva de custo semelhante à da Figura 2.4. Nesta figura, o ponto de custo ótimo, correspondente ao nível ótimo de rentabilidade, é aquele que apresenta o custo global mais baixo mesmo não sendo o que minimiza mais o consumo de energia primária. Entende-se, então, por nível ótimo de rentabilidade o desempenho energético que leva ao custo mais baixo durante o ciclo de vida económico estimado.



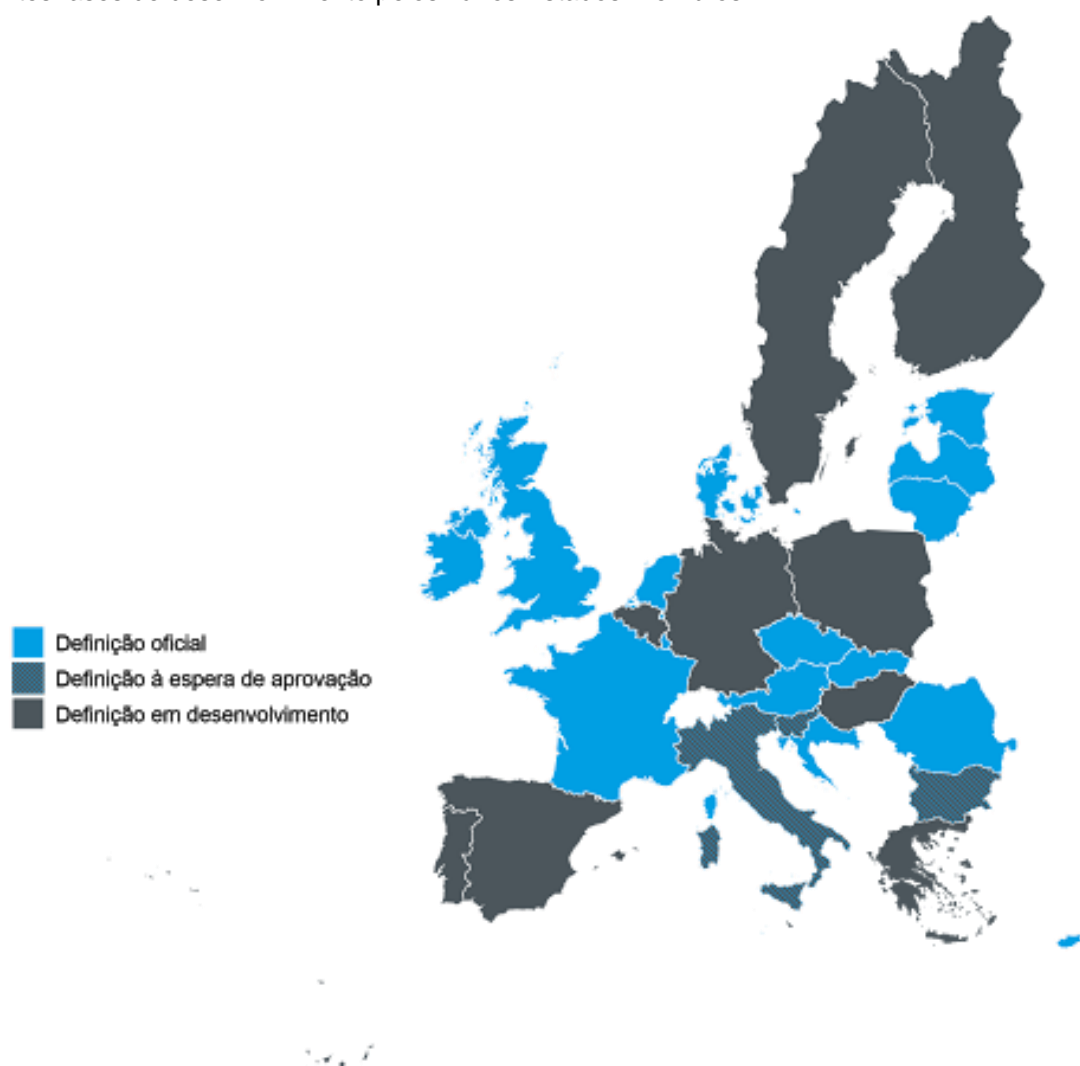
**Figura 2.4** - Exemplo de curva de custo e respetivo ponto de custo ótimo, adaptado de BPIE, 2010.

Em suma, a EPBD requer que cada Estado-Membro defina pormenorizadamente o modo como o conceito nZEB será aplicado na prática, refletindo as condições nacionais, regionais ou locais dos edifícios, e incluindo um indicador numérico da utilização de energia primária, expressa em  $kWh/m^2$  por ano. Ainda, devem ser estabelecidos os fatores de conversão para energia primária a serem aplicados. Adicionalmente, deverão ser incluídas informações sobre as políticas e as medidas financeiras para fomentar a criação de edifícios com necessidades quase nulas de energia, incluindo uma descrição pormenorizada dos requisitos e das medidas nacionais respeitantes à utilização de

energia proveniente de fontes renováveis (RES) nos edifícios novos e nos edifícios existentes sujeitos a grandes renovações (Art. 9º Dir 2010/31/UE).

## 2.2.2 Implementação da Diretiva 2010/31/UE

De acordo com a informação disponibilizada pela Comissão Europeia, através de publicações acerca dos progressos na implementação do requerido pela EPBD reformulada, dos vinte e oito países da UE pouco mais de metade (15 países e duas das três regiões pelas quais a Bélgica se divide), já têm uma descrição da aplicação na prática dos edifícios com necessidades quase nulas de energia para novos edifícios (BPIE, 2015). Como verificado na Figura 2.5, a definição concreta dos nZEBs encontra-se em diferentes fases de desenvolvimento pelos vários Estados-Membros.



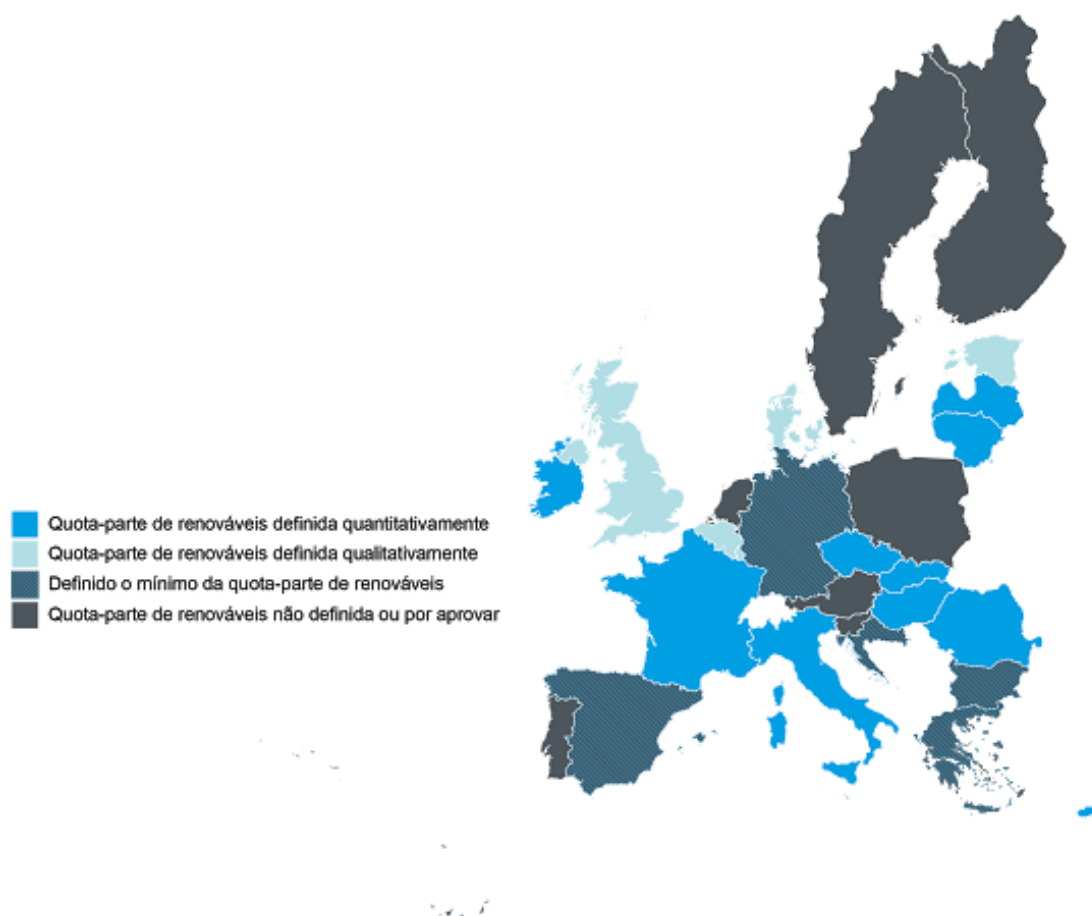
**Figura 2.5** - Estado do progresso da implementação da definição nZEB para novos edifícios na UE, adaptado de BPIE, 2015.

Note-se que, na Figura 2.5, só estão representados os países que têm uma definição oficial dos nZEBs para novos edifícios. Desses Estados-Membros, tanto a região da Flanders na Bélgica, como a Estónia e a Irlanda não têm ainda uma definição clara para o caso de edifícios já existentes sujeitos a grandes intervenções. Para além dos referidos, esta é também desconhecida nos seguintes países: Croácia, Eslováquia, Holanda, Luxemburgo, Reino Unido e Roménia.

Saliente-se, ainda, que alguns países estabeleceram objetivos mais ambiciosos que os previstos pela Diretiva 2010/31/UE: a Holanda pretende que todos os novos edifícios sejam NZEB, ou seja, tenham balanço energético nulo em vez de “quase nulo”; a França e a Dinamarca, vão mais além, requerendo que sejam “*plus energy buildings*” (edifícios que geram energia) e a Alemanha e o Reino Unido requerem que os novos edifícios tenham um balanço neutro em termos de emissões de carbono (Ecofys, 2014).

Relativamente ao indicador numérico para a utilização de energia primária, para os Estados-Membros que já o definiram, os valores variam entre os 20 kWh/(m<sup>2</sup>.ano) e os 270 kWh/(m<sup>2</sup>.ano). Porém, como se pode verificar na Tabela 2.1, nem todos definiram diretamente na unidade de kWh/(m<sup>2</sup>.ano). Realce-se, também, que este indicador se refere a diferentes consumos de energia para os diversos países. Alguns consideram aparelhos elétricos e sistemas auxiliares para além das necessidades de aquecimento, arrefecimento, aquecimento de água, ventilação e iluminação fixa previstas pela Diretiva 2010/31/UE. Noutros casos, não existe uma definição clara do que é considerado para o indicador do valor máximo de energia primária consumida.

No que concerne aos requisitos para a utilização de energia renovável, mais uma vez não há uniformidade. Segundo BPIE (2015), existem tanto definições qualitativas como quantitativas relativamente a edifícios classificados como nZEB. Existem também casos de países que já tinham os valores mínimos de quota-parte renovável definidos por outras normas que não as referentes aos nZEB - representados na Figura 2.6 a tracejado.



**Figura 2.6** - Estado do progresso da definição dos requisitos de quota-parte de energias renováveis na UE.

**Tabela 2.1 - Quadro-Resumo da definição do indicador numérico para a energia primária em edifícios nZEB nos diferentes Estados-Membros, Fontes: BPIE (2015); COM (2013); Ecofyz (2014); Kurnitski *et al.* (2014).**

Estado-Membro	Valor máximo de energia primária [kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]				Indicador referente a:							
	Edifícios novos		Edifícios sujeitos a grande intervenção		Aquecimento	Arrefecimento	AQS	Ventilação	Iluminação	Aparelhos elétricos	Sistemas auxiliares	SD
	Residenciais	Não Residenciais	Residenciais	Não Residenciais								
Áustria	160	170	200	250								x
Bélgica (Bruxelas)	45	~90 [1]	54	~108 [1]	x	x [2]	x		x [2]	x		
Bélgica (Flanders)	30% EPref [3]	40% EPref [3]	SD	SD	x	x	x	x			x	
Chipre	100	125	100	125	x	x	x		x			
Croácia	33-41 [4]	Em desenvolvimento	SD	SD	x	x	x	x	x			
Dinamarca	20	25	20	25	x	x	x	x	x [2]			
Eslováquia	32-54 [1]	34-96 [1]	SD	SD	x	x [2]	x	x [2]	x [2]			
Estónia	50-100 [1]	90-270 [1]	SD	SD	x	x	x	x	x	x	x	
França	40-65 [1,4]	70-110 [1,4]	80[4]	60% EPref [1]	x	x	x		x		x	
Holanda	Incluído no método de cálculo; o edifício tem de alcançar um coeficiente de desempenho energético igual a 0		SD	SD	x	x	x	x	x			
Irlanda	45	~60% EPref	75-150	SD	x		x	x	x			
Letónia	95	95	95	95	x	x	x	x	x			
Lituânia	Incluído no método de cálculo; O edifício tem que cumprir os requisitos da classe A++.		Incluído no método de cálculo; O edifício tem que cumprir os requisitos da classe A++.		x							
Luxemburgo	Incluído no método de cálculo; O edifício tem que cumprir os requisitos da classe A-A-A		SD	SD								x
Reino Unido	~44 [1]	SD	SD	SD								x
	Incluído no método de cálculo; O edifício tem que cumprir os requisitos de emissões de carbono ~0.											
República Checa	75%-80% [1,3]	90% [3]	75%-80% [1,3]	90% [3]								x
Roménia	93-217 [1,4]	50-192 [1,4]	SD	SD								x

**Notas:**

[1] – Dependendo do edifício de referência

[2] – Apenas para edifícios não residenciais

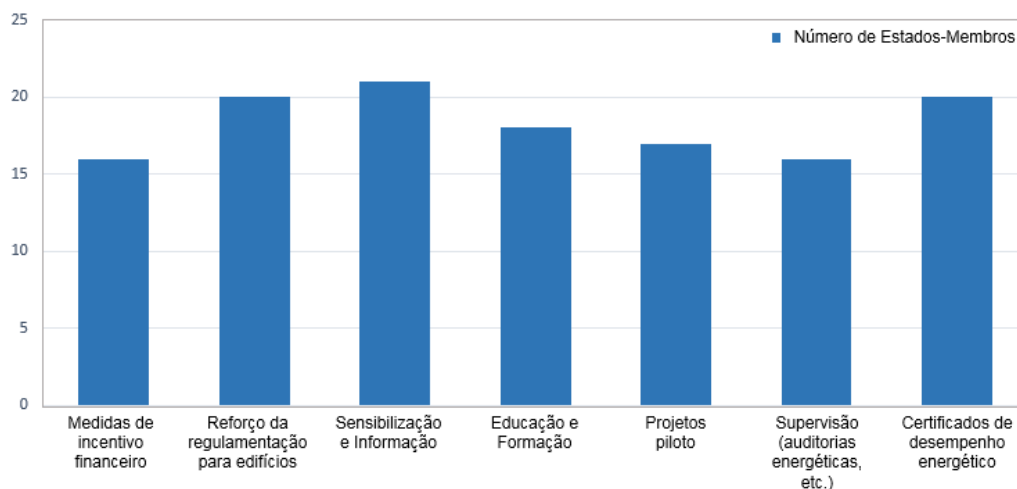
[3] – Dependendo da localização

[4] – Requisito dependente das medidas RES adotadas

EPref – Consumo de energia primária do edifício de referência correspondente

SD – Sem Dados

Por fim, é solicitado que os Estados-Membros promovam políticas e acionem medidas financeiras com vista a fomentar a criação de edifícios com necessidades quase nulas de energia. O gráfico da Figura 2.7 mostra as principais políticas e medidas estabelecidas pelos Estados-Membros. É de notar que vários países não tomaram qualquer medida neste sentido (Ecofys, 2014).



**Figura 2.7** - Principais políticas e medidas adotadas pelos Estados-Membros para fomentar novos nZEB; adaptado de Ecofys, 2014.

### 2.2.3 Diretiva 2012/27/UE para a Eficiência Energética dos Edifícios

A Diretiva 2012/27/UE de outubro de 2012 é a mais recente diretiva da UE para a Eficiência Energética dos Edifícios. Também conhecida como a EED (*Energy Efficiency Directive*), em traços gerais, esta procura despertar para a necessidade de ser estabelecida “uma estratégia a longo prazo para mobilizar investimentos na renovação do parque nacional de edifícios residenciais e comerciais, tanto públicos como privados” (Art. 4º Dir 2012/27/UE). Para tal, a EED define um quadro comum de medidas para a promoção da eficiência energética na União Europeia, a fim de assegurar que o objetivo de melhoramento em 27% na eficiência energética é atingido e abrir caminho para novas melhorias para além dessa data (Art. 1º Dir 2012/27/UE).

Desta forma, os Estados-Membros são incumbidos de fixar “objetivos indicativos nacionais de eficiência energética com base no consumo de energia primária ou final, nas economias de energia primária ou final, ou na intensidade energética” para 2020 (Art. 3º Dir 2012/27/UE). Além disso, todos os Estados-Membros devem definir medidas para que a energia seja utilizada de forma mais eficiente desde a sua transformação e distribuição até ao consumo final.

O Estado deve ter um papel exemplar para a concretização da meta estabelecida e, por isso, deve tomar medidas como a renovação anual de pelo menos 3% dos edifícios por ele administrados ou ocupados (Art. 4º Dir 2012/27/UE) e a aquisição de edifícios com um elevado desempenho energético, apenas (Art. 5º Dir 2012/27/UE).

A presente Diretiva já foi transposta para a legislação nacional em abril de 2015 pelo Decreto-Lei n.º 68-A/2015. No entanto, grande parte dos objetivos por ela definidos já haviam sido considerados na legislação nacional pelo Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o período 2013 -

2016, aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, em abril de 2013, como desenvolvido na secção 2.4.4.

## **2.3 Reabilitação de edifícios**

Dentro do conceito mais amplo, e, conseqüentemente, mais complexo, de Reabilitação Urbana, a reabilitação de edifícios surge como o principal meio para atingir as metas nZEB estabelecidas pela União Europeia já que, em Portugal, os edifícios de habitação existentes não estão sujeitos a requisitos de comportamento térmico ou de eficiência dos sistemas, exceto em caso de grande intervenção como disposto no Artigo 30º do Decreto-Lei nº 118/2013. A reabilitação de edifícios residenciais, em particular, oferece um potencial considerável para a promoção da eficiência energética e outros benefícios sustentáveis. Estudos recentes sugerem que o sector doméstico pode trazer uma contribuição significativa para a redução do consumo de energia em termos globais (Gaterell e McEvoy, 2005).

Considera-se como reabilitação qualquer intervenção que confira ao edifício uma qualidade (térmica e energética) superior à que possuía aquando da sua construção. Em Portugal, os objetivos da reabilitação de edifícios passam por: melhorar as condições de conforto térmico; reduzir os consumos de energéticos; corrigir situações anómalas - problemas a nível construtivo ou ambiental (Santos, 2012). Assim, distingue-se reabilitação das típicas obras de conservação, de reconstrução ou alteração que não impliquem modificações na estrutura com implicações na estabilidade, na altura do edifício, na forma das fachadas ou dos telhados.

Segundo as mais recentes Estatísticas de Construção e Habitação (relativas ao ano de 2014), 34,0% das obras concluídas em Portugal representam obras de reabilitação (alteração, ampliação e reconstrução), das quais, cerca de 56% do total de obras de reabilitação se destinaram a habitação familiar. Este valor é particularmente relevante quando se observa, na Tabela 2.2, a distribuição do número de alojamentos pelo período de construção e se depreende que cerca de metade dos alojamentos têm mais de 30 anos (isto é, foram construídos até 1980), período de vida estimado até que a envolvente dos edifícios comece a apresentar sinais de obsolescência (RePublic ZEB, 2015).

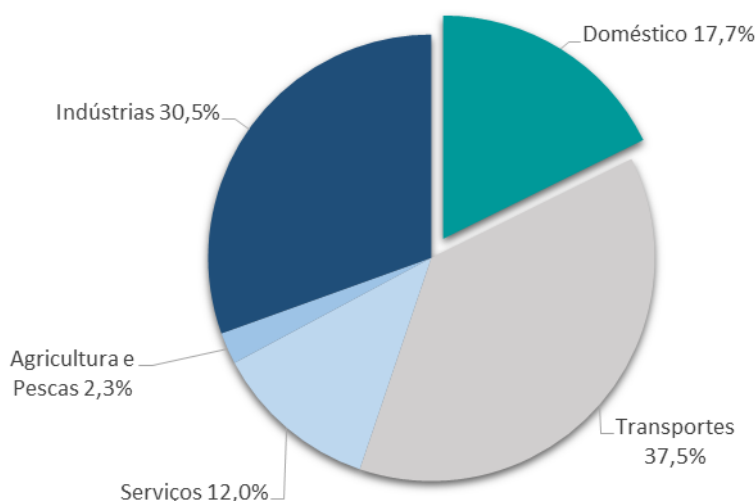
A idade dos alojamentos tem um impacto direto no consumo de energia, uma vez que nos edifícios mais antigos as perdas de energia são maiores, por questões de mau isolamento. Assim, os edifícios mais antigos têm um grande potencial de melhoria tornando-se essencial a sua reabilitação aplicando medidas de eficiência energética.

**Tabela 2.2** - Caracterização do parque habitacional por ano de construção - Portugal, 2010, adaptado de ICESD, 2010.

Ano	Total		
	Nº de Alojamentos	Nº de Indivíduos	Área total (m <sup>2</sup> )
Até 1945	295.652	652.987	25.372.088
1946 a 1960	382.501	870.171	31.312.268
1961 a 1970	539.710	1.330.276	48.485.677
1971 a 1980	820.185	2.094.346	82.569.913
1981 a 1990	693.795	2.011.742	79.460.947
1991 a 1995	458.900	1.410.690	54.882.343
1996 a 1999	317.460	942.158	39.599.331
2000 e seguintes	423.807	1.325.343	57.558.241
Total	3.932.010	10.637.713	419.240.808

## 2.4 Situação energética em Portugal

Em Portugal, como observado no gráfico da Figura 2.8, o setor doméstico representava, em 2009, 17,7% do consumo total de energia final. Deste valor, estima-se que cerca de metade seja consumida no setor residencial e o restante em transporte a nível individual já que, em 2010 - segundo o Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico, produzido pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) - o consumo nos alojamentos representava uma fatia de 49,4% do consumo no setor doméstico.

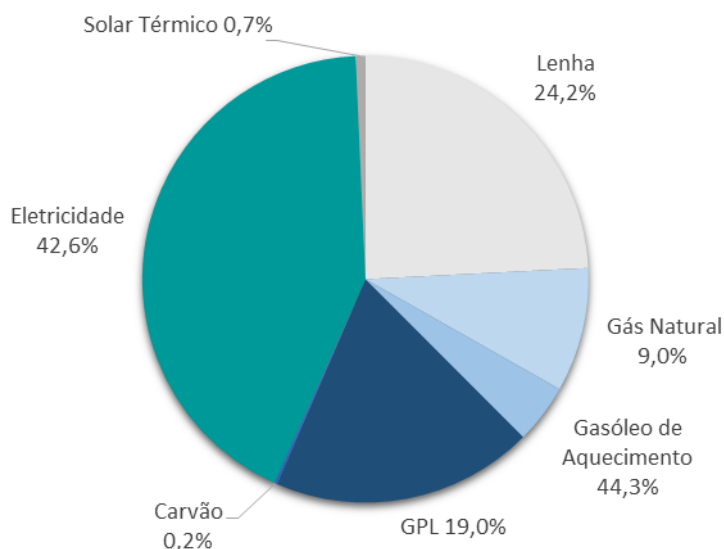


**Figura 2.8** - Distribuição do consumo de energia final por sector, 2009, adaptado de ICESD, 2010.

### 2.4.1 Consumos no setor residencial

Da energia total consumida em edifícios, é estimado que os edifícios residenciais tenham, na União Europeia, um peso de 63% nesse valor. Por conseguinte, o foco neste setor é importante quando se pretende reduzir o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub> (CCE, 2005).

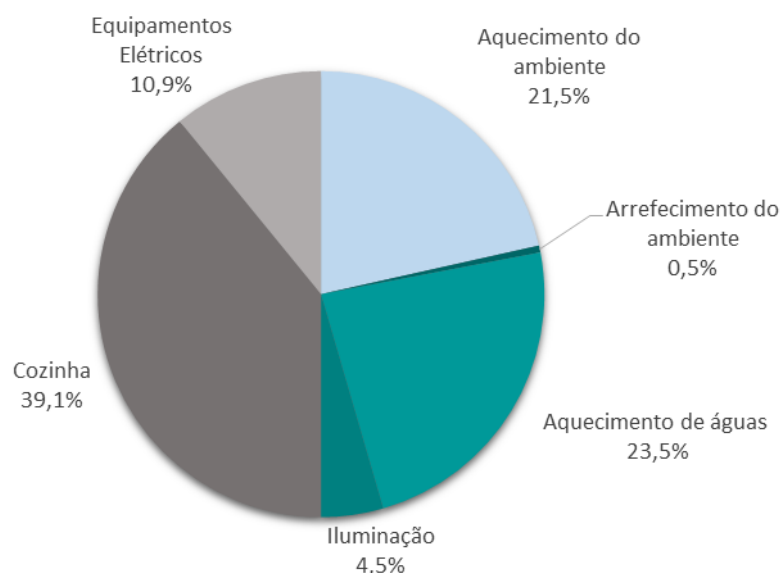
Da Figura 2.9, conclui-se que, de modo particular para Portugal, o consumo maioritário nos alojamentos é de energia sobre a forma de eletricidade. Tal facto tem, atualmente, um menor impacto no consumo de energias fósseis já que cerca de 61% da energia elétrica produzida é de origem renovável (hídrica, biomassa, eólica, geotérmica e fotovoltaica) (Pordata, Produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis).



**Figura 2.9** - Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de fonte - Portugal, 2010, adaptado de ICESD, 2010.

Ao longo dos anos, o consumo de eletricidade tem vindo a assumir um papel relevante no setor residencial passando de 15,8% em 1989, para 27,5% em 1996 e 42,6% em 2010. Esta evolução pode ser explicada pelo aumento das necessidades no que toca ao conforto térmico e pelo crescimento do número de equipamentos elétricos. Seguidamente, a lenha assume-se como a segunda principal fonte de energia com uma fatia de 24,2% do consumo total de energia nos alojamentos portugueses. Todavia, esta tem vindo a perder importância, evoluindo de forma inversa à eletricidade com valores que já foram de 60,3% em 1989 e de 41,9% em 1996 (ICESD, 2010).

A partir da Figura 2.10 realça-se que nas habitações, maioritariamente o consumo de energia acontece na cozinha. Os consumos sobre os quais a Diretiva da EPBD reformulada pretende que se concentrem esforços para a melhoria do desempenho energético dos edifícios, isto é os relativos ao aquecimento e arrefecimento do ambiente, aquecimento de águas e iluminação, representam exatamente 50% da energia utilizada pelo setor residencial nacional. Este valor poderia ser ainda mais expressivo caso Portugal não apresentasse um clima mediterrânico, com verões quentes e secos e invernos amenos, razão pela qual as necessidades de aquecimento e arrefecimento não são tão relevantes como noutros países da UE (Aelenei *et al.*, 2013).



**Figura 2.10** - Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de utilização - Portugal, 2010, adaptado de ICESD, 2010.

Analisando com maior detalhe, a Tabela 2.3 permite concluir que as necessidades de aquecimento do ambiente são colmatadas com recurso ao consumo de lenha, gásóleo de aquecimento ou eletricidade. No entanto, é de salientar que o elevado valor para o consumo de lenha não só é justificado pela utilização de lareiras, abertas ou com recuperador de calor, em 35% dos alojamentos que utilizaram equipamentos para o aquecimento do ambiente em 2010 (ICESD, 2010), mas também pode ser justificado pela menor eficiência associada ao não aproveitamento de todo o calor da combustão da lenha. Em contraste, para o arrefecimento do ambiente é apenas consumida eletricidade e, na sua maioria, por parte de ventiladores (ICESD, 2010). Por fim, o aquecimento de águas é conseguido recorrendo ao consumo de gás (butano, natural e propano, por ordem de relevância) geralmente em esquentadores (ICESD, 2010).

**Tabela 2.3** - Consumo de energia (tep) no alojamento por tipo de energia e tipo de utilização - Portugal, 2010, adaptado de ICESD, 2010.

Fonte	Aquecimento do ambiente	Arrefecimento do ambiente	Aquecimento de águas	Cozinha	Equipamentos Elétricos	Iluminação
Eletricidade	74.348	13.107	19.369	332.557	269.694	111.309
Lenha*	360.828	//	41.016	292.347	//	//
GPL Garrafa Butano	10.085	//	201.173	184.857	//	//
GPL Garrafa Propano	318	//	48.284	39.136	//	//
Gás Natural	8.231	//	162.782	92.494	//	//
GPL Canalizado	2.899	//	43.396	24.330	//	//
Gasóleo Aquecimento	75.445	//	49.191	//	//	//
Solar Térmico	1.546	//	17.559	//	//	//
Carvão	192	//	x	6.212	//	//
<b>Total</b>	<b>533.892</b>	<b>13.107</b>	<b>582.770</b>	<b>971.933</b>	<b>269.694</b>	<b>111.309</b>

\*Excluindo pellets e briquetes.

## **2.4.2 Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação**

O Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) é estabelecido no Decreto-Lei nº 118/2013 e tem como objetivo “promover a melhoria do respetivo comportamento térmico, a eficiência dos seus sistemas técnicos e a minimização do risco de ocorrência de condensações superficiais nos elementos da envolvente”. Neste sentido, aponta requisitos, parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético para os edifícios de habitação, novos ou sujeitos a grandes intervenções (Artigo 22.º DL 118/2013).

Para os edifícios novos ou sujeitos a grandes intervenções, o REH traça objetivos ao nível do comportamento térmico, fixando valores para: a qualidade térmica da envolvente - expressos em termos de coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca e de fator solar dos vãos envidraçados; a ventilação dos espaços - impondo um valor mínimo de cálculo para a taxa de renovação do ar e para as necessidades anuais nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento do edifício (Art. 24º DL 118/2013).

Ainda, define requisitos relativos à eficiência, qualidade e funcionamento dos sistemas técnicos a instalar nos edifícios; regras para cálculo do contributo das energias renováveis na satisfação das necessidades energéticas do edifício e valores de necessidades nominais de energia primária do edifício (Art. 25º DL 118/2013).

Finalmente, é de realçar que se torna obrigatória a instalação de sistemas solares térmicos para aquecimento de água sanitária num edifício novo sempre que haja exposição solar adequada ou num edifício sujeito a grande intervenção sempre que os sistemas de produção e de distribuição de água quente sanitária sejam parte dessa intervenção. Em alternativa à utilização de sistemas solares térmicos, podem ser considerados outros sistemas de aproveitamento de energias renováveis que garantam, numa base anual, energia equivalente ao sistema solar térmico (Art. 29º DL 118/2013).

## **2.4.3 Certificação energética**

No Decreto-Lei nº 118/2013 (alterado no Decreto-Lei n.º 251/2015) encontra-se a mais recente revisão ao Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE). Este sistema aplica-se quer no âmbito residencial quer no não-residencial (de comércio e serviços). No âmbito residencial, o SCE abrange os edifícios novos; os edifícios, ou frações, sujeitos a grande intervenção (ou seja intervenções na envolvente ou nas instalações técnicas do edifício cujo custo seja superior a 25% do valor do edifício) e, a todos os edifícios existentes aquando da celebração de contratos de venda ou de arrendamento. Assim, o SCE implica a emissão, por parte de um profissional qualificado, de um certificado energético, válido por um período de dez anos, que, no caso de venda ou arrendamento do imóvel, é mandatário que seja apresentado ao potencial comprador ou arrendatário (Santos *et al.*, 2011). Neste documento é especificada a classe energética do edifício, ou fração (numa escala predefinida de oito classes, de A+ a F), e é feita uma listagem de medidas sugeridas, que mostrem uma boa relação custo-eficácia, para melhorar o respetivo desempenho energético. Atualmente, o certificado energético contém ainda detalhes relativos à qualidade do ar interior.

As classes energéticas para os edifícios residenciais são determinadas pelo rácio entre o valor efetivo das necessidades nominais de energia primária anual e as previstas pela legislação de acordo com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) – também disponível no DL 118/2013. A classificação do edifício ou fração é feita conforme o resultado obtido no rácio, expresso em percentagem, segundo a etiquetagem referida na Tabela 2.4, estando associada a cada uma das classes uma cor identificativa.

**Tabela 2.4** - Classes energéticas segundo o desempenho energético do edifício residencial, adaptado de RePublic ZEB, 2015.

Classe Energética	Valor do rácio
A+	0% a 25%
A	26% a 50%
B	51% a 75%
B-	76% a 100%
C	101% a 150%
D	151% a 200%
E	201% a 250%
F	Mais de 251%

#### 2.4.4 Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

O Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) é um instrumento de planeamento energético que assegura a melhoria na eficiência energética do País estabelecendo o modo para alcançar as metas e compromissos assumidos por Portugal (Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013). Assim, através do PNAEE para o período 2013-2016 foi estimada uma poupança de 1.501ktep (em energia final) até 2016, equivalente a uma redução no consumo energético de aproximadamente 8,2% em relação ao consumo verificado entre os anos de 2001 e 2005. Este valor, por sua vez, aproxima-se da meta indicativa da UE para a poupança de 9% de energia pelo mesmo período temporal (da Diretiva 2006/32/CE) e é um passo para o objetivo de redução de 20% em energia primária por todos os Estados-Membros (da Diretiva 2010/31/UE) e de 25% conforme ambicionado pelo governo português (<http://www.pnaee.pt/pnaee>). Neste sentido, conforme descrito no documento disponibilizado pela DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia) acerca da Estratégia Nacional para a Renovação de Edifícios, publicado em agosto de 2014, o PNAEE contempla diversas medidas de promoção de eficiência energética para seis áreas: transportes; residencial e serviços; indústria; estado; comportamentos e agricultura. Para a concretização dessas medidas, o PNAEE recorre a outras ferramentas como incentivos económicos e financeiros, à supervisão das mesmas através de auditorias

ou de aconselhamentos energéticos e à contínua informação, divulgação e demonstração pública (RePublic ZEB, 2015).

No que concerne ao setor residencial e dos serviços, o PNAEE veio estabelecer três programas com medidas específicas de melhoria do desempenho energético: “Renove Casa & Escritório”; “Sistema de Eficiência Energética nos Edifícios” e “Renováveis na Hora e Programa Solar”. Mais especificamente, o programa intitulado por “Renove Casa & Escritório” define as seguintes medidas para tornar mais eficiente o parque de eletrodomésticos, de equipamentos elétricos e da iluminação:

- **Promoção de equipamentos mais eficientes** – Esta medida visa impor limites às classes de desempenho energético colocadas no mercado.
- **Iluminação eficiente** – O objetivo desta medida passa pela substituição de lâmpadas de baixa eficiência energética e respetiva eliminação do mercado de forma gradual.
- **Janela Eficiente** - Tem como finalidade a reabilitação de superfícies envidraçadas, através da utilização de vidro duplo, de caixilharia com corte térmico, ou de vidros eficientes (de baixa emissividade).
- **Isolamento Eficiente** – Esta medida pretende incentivar a aplicação de isolamento térmico eficiente em coberturas, pavimentos e paredes aquando das intervenções na envolvente do edifício.
- **Calor Verde** - Esta medida refere-se à aplicação de recuperadores de calor nos alojamentos, como complemento e alternativa aos meios tradicionais de aquecimento ambiente (lareira aberta).

Já o programa “Sistema de Eficiência Energética nos Edifícios” estabelece para os novos edifícios ou grandes reabilitações, tanto residenciais como de serviços, que alcancem quotas mínimas por classes energéticas eficientes (B- a A+).

De forma semelhante ao programa anterior, o programa “Renováveis na Hora e Programa Solar” contempla apenas medidas para a aplicação de solar térmico tanto no âmbito residencial como no dos serviços. A nível residencial, o objetivo é a criação de um mercado sustentado de 100 mil m<sup>2</sup> de coletores solares instalados por ano e de 40 mil m<sup>2</sup> de coletores solares por ano em edifícios do setor dos serviços.

## **2.5 Promoção de medidas de eficiência energética na reabilitação de edifícios em Portugal**

As Estatísticas de Construção e Habitação - 2014 indicam que a taxa de crescimento do número de edifícios, em Portugal, tem vindo a diminuir, tendo, em 2013, alcançado um valor mínimo de 0,3% face ao ano anterior. Tal facto, reforça a importância da aplicação de medidas de eficiência energética não apenas em edifícios novos mas, principalmente, em edifícios, ou frações, reabilitadas.

Portugal é um dos países da União Europeia com menor consumo energético habitacional, esta realidade é justificada pelas condições climáticas nacionais já que, no geral, o edificado existente

existe apresenta um fraco desempenho energético (Aelenei *et al.*, 2013). Contudo, a partir de um estudo de Aelenei *et al.* (2010) é possível concluir que os edifícios existentes atualmente, não reabilitados, têm potencial para alcançar a meta nZEB recorrendo apenas à instalação de um número suficiente de painéis solares fotovoltaicos e de coletores solares. Todavia, esta estratégia falha o principal objetivo para a criação de edifícios nZEB, o da introdução de medidas que reduzam as necessidades energéticas do edifício.

Assim, para que a implementação da meta nZEB seja bem-sucedida é necessário promover medidas de eficiência energética na reabilitação de edifícios. Uma vez estabelecidas, deverão então ser avaliadas através de uma ferramenta de apoio à decisão com base em otimização multiobjetivo (maximizar o desempenho energético, minimizando, simultaneamente, os custos incorridos).

## 2.6 Conclusões do Capítulo

Tendo surgido há cerca de uma década, o conceito de edifício de balanço energético nulo (NZEB) está hoje muito presente nas políticas energéticas que têm vindo a ser estabelecidas um pouco por todo o mundo. Este conceito sugere que os edifícios (NZEB) tenham um alto desempenho energético (para que o seu consumo de energia seja o mais reduzido possível), produzindo, através de fontes renováveis, a energia necessária para responder às suas necessidades energéticas residuais.

Através da implementação de edifícios NZEB, com a construção de novos edifícios ou transformação do edificado existente, será possível alcançar metas de redução de emissões de gases de efeito de estufa (entre eles o CO<sub>2</sub>) e de redução do consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis - fatores particularmente inquietantes nos dias de hoje.

A União Europeia não tem ficado alheia às preocupações climáticas e energéticas que vão sendo uma constante na atualidade. Assim, nos últimos anos tem desenvolvido uma série de políticas com vista a promover a utilização de energias renováveis e a redução do consumo energético e das emissões de CO<sub>2</sub>. Especificamente para o setor dos edifícios, a UE lançou a Diretiva 2010/31/UE relativa ao Desempenho Energético - com especial relevância para este trabalho - e a Diretiva 2012/27/UE que visa a promoção do aumento da eficiência energética.

A Diretiva 2010/31/UE propõe que a partir de 2018, no caso de edifícios detidos por autoridades públicas, ou de 2020 para todos os restantes, os edifícios construídos de raiz ou sujeitos a grandes intervenções, sejam edifícios de balanço energético quase nulo (nZEB) – um conceito similar ao NZEB, com a diferença de ser, apenas, menos ambicioso. Por conseguinte, este objetivo deve ser alcançado através da definição de requisitos mínimos para o consumo de energia e para a produção de energia renovável por parte de cada Estado-Membro - os quais devem ser avaliados segundo uma lógica de custo-benefício.

Esta diretiva tem sido transposta para a legislação dos vários Estados-Membros. No entanto, dadas as condições climáticas de cada país e as suas próprias metas energéticas, as definições vão variando de Estado-Membro para Estado-Membro. Neste sentido, é de ressaltar que Portugal, à semelhança de outros países, não tem ainda definido concretamente a sua meta nZEB.

Para que os objetivos inerentes à aplicação das diretivas anteriormente referidas sejam alcançados, a reabilitação do edificado existente torna-se fundamental já que a taxa de surgimento de novos edifícios em Portugal é muito pequena.

Paralelamente a esta informação, note-se que o consumo energético nos edifícios residenciais representava, em 2009, cerca de 9% da energia total final consumida no país, sendo que para este valor contribuem - em 50% das necessidades energéticas das residências portuguesas - os consumos relativos ao aquecimento e arrefecimento do ambiente, aquecimento de águas sanitárias e iluminação.

Para regulamentar o consumo energético no setor residencial, a política energética portuguesa serve-se, atualmente, do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação, do Sistema de Certificação Energética e do Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética.

A definição da meta nZEB contribuirá para que, num futuro breve, a política energética nacional seja atualizada com o intuito de se direcionar no sentido para o qual a União Europeia já se conduz. Todavia, esta decisão deverá ser convenientemente apoiada e, como tal, deve ser aplicado um modelo de otimização multiobjectivo que avalie várias medidas de eficiência energética passíveis de serem postas em prática.

Em suma, apesar da definição da meta nZEB se revelar uma decisão complicada, esta será essencial para que haja um esforço conjunto de todos os Estados-Membros a fim alcançar as metas climáticas e energéticas estabelecidas pela UE pelo ano de 2030.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica aos trabalhos de investigação referentes à aplicação de otimização multiobjetivo no momento do planeamento e conceção de edifícios NZEB. Por conseguinte, são explorados os métodos, as funções-objetivo e as possíveis abordagens para a determinação de soluções de custo-ótimo comuns neste tipo de estudos.

### 3.1 Introdução

A otimização para a criação de edifícios de balanço energético nulo, ou quase nulo, põe em conflito vários objetivos distintos. Assim, neste tipo de problemas torna-se necessário avaliar o *trade-off* entre, por exemplo, minimizar as emissões de CO<sub>2</sub>; maximizar o conforto; minimizar os custos; minimizar o consumo de energia e maximizar a produção de energia renovável.

A avaliação deste tipo de *trade-offs* é feita pelo decisor. No entanto, a tomada de decisão é facilitada se, anteriormente, tiverem sido obtidas as soluções que se mostrarem mais eficientes na resolução do problema. Para que se encontrem estas soluções, no apoio à decisão para a conceção de edifícios de NZEB, recorre-se, tipicamente, a uma (ou à combinação) destas técnicas: simulação, avaliação multicritério e/ou otimização multiobjetivo (Asadi *et al.*, 2012).

Relativamente à abordagem deste tipo de problemas por via da simulação, existem, hoje em dia, diversas ferramentas que visam simular o comportamento de um edifício em termos energéticos (com várias métricas disponíveis para avaliar o desempenho energético) - Attia (2011) compara dez destas ferramentas em termos de aplicações para a conceção de edifícios NZEB. Porém, o processo iterativo de tentativa-erro para encontrar o conjunto de soluções que melhor se adequa - associado à técnica de simulação - revela-se ineficiente - em termos de tempo necessário - e ineficaz quando se pretende explorar um amplo conjunto de opções (Asadi *et al.*, 2012).

No que concerne à avaliação multicritério para a análise de decisão no momento da conceção de NZEBs, esta baseia-se na comparação de soluções alternativas já previamente definidas e avaliadas - o que por si só constitui uma limitação (Diakaki *et al.*, 2008), já que, quando é alargada a opção de escolha, ou seja, quando há um grande número de possíveis soluções, o processo de avaliação e seleção torna-se complicado de gerir. Deste modo, Wright *et al.* (2002) combina a avaliação multicritério com um algoritmo genético como alternativa para tornar a procura de soluções não-dominadas (conceito explorado mais à frente nesta secção) num processo computacionalmente menos intensivo.

A aplicação de modelos de otimização multiobjetivo (MOO) vem colmatar as limitações dos métodos anteriores uma vez que, através da otimização, é possível encontrar as soluções que maximizam ou minimizam uma dada função-objetivo, considerando possíveis restrições (Baños *et al.*, 2011). Contudo, apesar de se denominar "otimização multiobjetivo", não existem soluções ótimas, existem soluções eficientes (ou soluções não-dominadas) que demonstram responder melhor às funções-objetivo do que outras.

Esta noção de soluções não-dominadas *versus* soluções dominadas é explorada por Pareto e é comum para problemas multiobjetivo. Segundo Pareto, uma solução X é não-dominada quando não existe nenhuma solução Y que a domine (isto é, que não seja pior do que X em todos os objetivos e, simultaneamente, seja melhor do que X em pelo menos um objetivo). Quando o problema tem dois objetivos, diz-se que as soluções não-dominadas formam uma “Curva de Pareto” (também conhecida por “Frente de Pareto”), no plano bi-dimensional. Por sua vez, quando existem três objetivos, as soluções não-dominadas formam uma “Superfície de Pareto”, no plano tri-dimensional.

## **3.2 Otimização Multiobjetivo para NZEB**

Especificamente no que refere à conceção de edifícios NZEB – quando se considera a conceção de edifícios NZEB está implícito a consideração da tipologia nZEB uma vez que é um conceito que deriva do anterior – vários casos de estudo já foram realizados no sentido de avaliar a aplicabilidade da otimização multiobjetivo. Aqui, a função da otimização multiobjetivo é a de encontrar soluções eficientes que possam ser consideradas no momento de planeamento da construção ou reabilitação de um edifício para que, no conjunto de soluções aplicadas, este alcance os objetivos estabelecidos na definição de edifícios NZEB. Deste modo, foi feita uma revisão ao estado da arte no âmbito da otimização multiobjetivo aplicada à conceção e reabilitação de edifícios onde se pretende melhorar o desempenho energético, independentemente de o objetivo principal ser tornar o edifício NZEB ou não.

Porém, importa salientar que os problemas de otimização multiobjetivo podem também ser resolvidos por métodos que só possam ser aplicados a uma única função-objetivo. Para que isso aconteça basta que seja possível ponderar as várias funções-objetivo e avaliá-las em unidades com características iguais, ou semelhantes, com vista a torná-las numa só função-objetivo.

### **3.2.1 Análise e comparação do estado da arte**

A conclusão da referida revisão bibliográfica encontra-se na Tabela 3.1 onde são comparadas as metodologias aplicadas e os problemas estudados em vinte e três trabalhos de investigação. Note-se que a maioria destes trabalhos foi publicada nos últimos anos (após o lançamento da EPBD reformulada), conforme expectável dado o crescente interesse pela temática NZEB.

#### **Abordagem do modelo**

Da análise da Tabela 3.1 é possível concluir que das duas abordagens possíveis para problemas de otimização multiobjetivo – por via exata e por aplicação de metaheurísticas – a mais comum é a que recorre a metaheurísticas. Tal facto pode ser justificado pela complexidade que este tipo de problemas acrescenta aos modelos, tornando-os computacionalmente intensivos no processo de otimização por via exata. Mais concretamente, a principal diferença entre estas duas abordagens reside no processo usado para encontrar soluções. Enquanto na abordagem exata é usado o gradiente ou a matriz Hessiana da função-objetivo, quando se recorre a metaheurísticas a pesquisa de soluções é aleatória e o alcance de soluções eficientes é possível graças à acumulação de experiência facilitando a identificação das melhores soluções (Boussaïd *et al.*, 2013).

**Tabela 3.1** - Síntese da revisão ao estado da arte para aplicação de modelos de otimização multiobjetivo.

Trabalho de investigação	Aplicação	Local	Funções Objetivo	Abordagem	Método
Antipova <i>et al.</i> (2014)	Casa Germinada	Portugal (Centro)	1. Minimizar custo total; 2. Minimizar impacto ambiental.	Exata	MILP
Asadi <i>et al.</i> (2014)	Escola	Coimbra, Portugal	1. Minimizar o consumo de energia (total); 2. Minimizar os custos de investimento; 3. Minimizar o desconforto térmico.	Metaheurística	GA e ANN
Ascione <i>et al.</i> (2015)	Edifício residencial	Nápoles, Itália	1. Minimizar o desconforto térmico; 2. Minimizar o consumo de energia primária pelo sistema de ar condicionado.	Metaheurística	GA elitista controlado
Ascione <i>et al.</i> (2016)	Hospital	Itália (Sul)	1. Minimizar custos de investimento; 2. Minimizar variação no consumo de energia primária; 3. Minimizar diferença no custo global.	Metaheurística	GA elitista controlado
Azari <i>et al.</i> (2016)	Edifício de escritórios	Seattle, EUA	Minimizar o impacto ao longo do ciclo de vida*	Metaheurística	NSGA-II e ANN
Carluccio <i>et al.</i> (2015)	Moradia	Sul de Itália	1. Minimizar o desconforto térmico sentido no inverno; 2. Minimizar o desconforto térmico sentido no verão; 3. Minimizar o desconforto visual devido ao brilho intenso; 4. Minimizar o desconforto visual devido a uma quantidade desajustada de luz do dia.	Metaheurística	NSGA-II
Delgarm <i>et al.</i> (2016)	Quarto num edifício com vários pisos	Irão (várias zonas climáticas)	1. Minimizar o consumo de eletricidade anual para iluminação; 2. Minimizar o consumo anual de eletricidade para arrefecimento do ambiente; 3. Minimizar o consumo anual de eletricidade para aquecimento do ambiente.	Metaheurística	PSO
Eilhauer (2015)	Apartamento e vivenda	Lisboa, Portugal	1. Minimizar LCOT; 2. Minimizar consumo de energia (aquecimento e arrefecimento do ambiente e aquecimento de águas).	Metaheurística	NSGA-II
Gossard <i>et al.</i> (2013)	Moradia	Nancy e Nice, França	1. Minimizar o consumo energético anual; 2. Minimizar o desconforto térmico sentido no verão.	Metaheurística	NSGA-II e ANN
Hamdy <i>et al.</i> (2013)	Vivenda	Finlândia	1. Minimizar o LCC; 2. Minimizar o consumo de energia primária.	Metaheurística	PR-GA
Hasan (2011)	Vivenda	Finlândia	1. Minimizar custos de investimento; 2. Minimizar consumo de energia anual para aquecimento do ambiente.	Metaheurística	Combina simulação e GA
Magnier & Haghghat (2010)	Casa Germinada	Canadá	1. Minimizar o desconforto térmico; 2. Minimizar o consumo de energias por sistemas AVAC.	Metaheurística	NSGA-II e ANN
Malatji <i>et al.</i> (2013)	Edifício com 25 instalações a serem intervenionadas	África do Sul	1. Maximizar poupanças energéticas; 2. Minimizar o período de Payback.	Metaheurística	GA com função de penalização
Monteiro <i>et al.</i> (2016)	Escola	Lisboa, Portugal	1. Minimizar custos de investimento; 2. Minimizar as necessidades energéticas (aquecimento e arrefecimento).	Metaheurística	NSGA-II
Murray <i>et al.</i> (2014)	Edifício de uma universidade	Irlanda	1. Minimizar os custos de energia; 2. Minimizar o período de Payback ; 3. Minimizar as Emissões de carbono.	Metaheurística	GA
Penna <i>et al.</i> (2015)	Vários edifícios	Itália	1. Minimizar o VAL; 2. Minimizar o desconforto térmico; 2. Maximizar o desempenho energético para o aquecimento.	Metaheurística	GA
Shao <i>et al.</i> (2014)	Edifício de escritórios	Alemanha	1. Minimizar os custo de investimento; 2. Minimizar a energia consumida anualmente; 3. Minimizar a emissão de gases de efeito de estufa.	Metaheurística	NSGA-II
Son e Kim (2016)	Edifício de uma universidade	Coreia do Sul	1. Minimizar o consumo de energia; 2. Minimizar emissões de CO2; 3. Minimizar custos de investimento; 4. Maximizar o conforto térmico.	Metaheurística	NSGA-III
Tadeu <i>et al.</i> (2016)	T2	Amarante, Portugal	1. Minimizar o custo global; 2. Minimizar o consumo de energia primária.	Metaheurística	NSGA-II
Wang <i>et al.</i> (2005)	Edifício de escritórios com um piso	Montreal, Canadá	1. Minimizar LCC; 2. Minimizar o impacto ambiental no ciclo de vida da envolvente do edifício.	Metaheurística	GA estruturado
Wang <i>et al.</i> (2014)	Edifício com 25 instalações a serem intervenionadas	África do Sul	1. Maximizar poupanças energéticas; 2. Minimizar o período de Payback.	Metaheurística	DE
Wang <i>et al.</i> (2015)	Campus de uma universidade	Estocolmo, Suécia	1. Minimizar o LCC; 2. Minimizar a emissão de gases do efeito de estufa.	Metaheurística	NSGA-II

\*Minimizar: energia operacional; potencial de aquecimento global; potencial de acidificação; potencial de destruição da camada do ozono; potencial de eutrofização e potencial para a formação de smog

## Métodos de otimização

Antipova *et al.* (2014) é o único exemplo encontrado que usa a Programação Linear Inteira Mista (MILP) – um método do domínio da abordagem exata. No entanto, o recurso ao método MILP só acontece porque todas as variáveis de decisão são binárias - assumem o valor de 0 ou de 1 – o que permite que as soluções não-dominadas sejam encontradas mais facilmente.

Dentro da abordagem por metaheurísticas, os métodos utilizados nestes trabalhos de investigação são maioritariamente baseados em algoritmos que usam a lógica evolucionária para gerar uma população que, neste caso, consiste nas possíveis soluções do problema. Exemplos de algoritmos que derivam desta lógica evolucionária são: algoritmo genético (GA); GA de classificação não dominada (NSGA-II); NSGA-III (uma variante do anterior); PR\_GA; GA estruturado; GA elitista controlado e algoritmo de evolução diferencial (DE). Para além destes, existem ainda algoritmos que se baseiam na lógica dos enxames, estes são conhecidos como métodos de otimização do enxame de partículas (PSO).

Como se pode verificar, os métodos mais utilizados são referentes a algoritmos genéticos e a suas variantes. Num algoritmo genético o termo indivíduo refere-se a uma possível solução para um problema (isto significa que o indivíduo é caracterizado pelos valores que cada uma das variáveis de decisão assumiu) e uma população a um conjunto de soluções. Existem três mecanismos aleatórios envolvidos na geração de novos indivíduos: a seleção (escolhe os indivíduos de acordo com a sua adequação ao problema); o *crossover* (gera dois novos indivíduos combinando partes de dois indivíduos da população existente) e a mutação (faz alterações num indivíduo permitindo que o processo de otimização não fique estagnado num certo ponto). Cada vez que uma nova população é criada, esta é considerada uma geração. Assim, a operação de um algoritmo genético inicia-se pela criação de uma população. Posteriormente esta é avaliada e é imposta uma penalização aos indivíduos menos adequados ao problema. Desta forma, a geração seguinte a ser formada vai estar mais adequada ao problema que a anterior. Este ciclo é repetido consoante o número de gerações definido pelo utilizador - o que normalmente dependerá da complexidade do problema (Caldas e Norford, 2002).

Especificamente para os algoritmos genéticos, o utilizado na maioria dos trabalhos de investigação foi o NSGA-II. Neste, a principal diferença para um GA convencional está na classificação dos cromossomas - entende-se por cromossomas o código genético carregado pelo indivíduo, ou seja, concretamente a codificação dos valores para as diferentes variáveis de decisão do problema (Azari, 2016). Por conseguinte, um NSGA-II classifica-os segundo a sua dominância, facilitando o alcance das soluções não-dominadas. A partir deste algoritmo foi formulado um NSGA-III que se mostra mais eficiente em problemas de otimização multiobjetivo com mais do que duas funções-objetivo (Kim e Son, 2016).

Para além dos já enunciados, em Wang *et al.* (2005) é aplicado um método com GA estruturado. Neste algoritmo, o cromossoma do indivíduo é representado como uma estrutura de genoma hierárquica, o que significa que genes dominantes e recessivos podem coexistir num mesmo cromossoma, conferindo uma maior probabilidade para que o indivíduo mantenha uma maior

adequação ao problema (Dasgupta e McGregor, 1993). Ascione *et al.* (2016), por sua vez, recorre a um método GA elitista controlado (uma variante do NSGA-II). Este permite uma avaliação mais fiável da frente de Pareto, assegurando uma diversidade mais elevada na população. Já Hamdy *et al.* (2013) aplica um PR\_GA, isto é, um algoritmo que combina um GA determinístico com um elitista controlado para lidar tanto com variáveis contínuas, como discretas, evitando a repetição e mantendo guardadas todas as iterações num arquivo para usá-las em processos de classificação de soluções não-dominadas. Este algoritmo revela-se vantajoso porque é capaz de obter boas soluções sem serem necessárias muitas gerações (Hamdy *et al.*, 2013).

Um outro método do âmbito dos algoritmos evolucionários é o DE – aplicado em Wang *et al.* (2014). Este algoritmo é muito semelhante ao GA contudo, num DE, cada um dos novos indivíduos gerados compete com os indivíduos que o originou avaliando-se qual deles se adequa melhor ao problema para que seja selecionado para a geração seguinte (Boussaïd *et al.*, 2013).

Delgarm *et al.* (2016) é o único dos trabalhos analisados a recorrer ao algoritmo PSO. Este método inicia-se com a geração aleatória de várias entidades autónomas (partículas). Cada uma destas partículas é uma possível solução do problema e é caracterizada pela sua velocidade (gerada aleatoriamente) e localização (o valor para cada uma das variáveis de decisão). Tem também memória o que faz com que se recorde na anterior melhor posição. O conjunto de partículas a voar pelo espaço de pesquisa de soluções (D-dimensional, onde o D é o número de variáveis de decisão do problema) consiste num enxame. Neste algoritmo, as partículas movem-se a cada iteração na direção de uma solução não-dominada de acordo com a sua própria experiência e a dos seus vizinhos (Boussaïd *et al.*, 2013).

Importa ainda mencionar que nos trabalhos de investigação desenvolvidos alguns dos métodos referidos foram combinados com ferramentas de simulação do comportamento do edifício ou com redes neuronais artificiais (ANN - estruturas que imitam redes biológicas e que se mostram computacionalmente eficientes para resolver problemas não-lineares complexos) para facilitar o processo de otimização.

## **Considerações dos problemas**

Dos problemas analisados, não há uma tipologia de aplicação mais comum. Os casos de estudo referem-se quer a edifícios residenciais, quer a edifícios destinados a acolher escritórios de empresas ou serviços públicos – note-se que as áreas de consumo energético com maior relevância diferem entre estes dois tipos de edifícios. Ainda, é de realçar que os casos de estudo são aplicados tanto a edifícios de referência já existentes (para serem reabilitados), como a planos para edifícios (para serem construídos de raiz). Por outro lado, a maioria dos trabalhos de investigação analisou edifícios em países europeus - tal facto poderá ser justificado pelos esforços realizados no estudo para a implementação da EPBD reformulada.

No que diz respeito às funções-objetivo de cada modelo, as soluções requeridas são normalmente avaliadas numa lógica de custo-ótimo, já que é muito comum uma das FO ser referente a minimização de custos ou à maximização do *Payback*. Ainda, os objetivos são, por norma, de encontrar soluções

que se revelem mais eficientes em termos energéticos (apenas no domínio operacional), considerando-se por diversas vezes a maximização do conforto térmico (ou minimização do desconforto).

É também interessante referir quais as variáveis de decisão mais comuns, isto é, as opções consideradas a ser incluídas no edifício – esta informação não está detalhada na Tabela 3.1 por limitações de espaço e dificuldade de uniformização da mesma. Assim, estas envolvem, maioritariamente, a alteração de aspetos da envolvente do edifício (características de espessura e isolamento de paredes, chão, janelas e telhado) e de sistemas de aquecimento do ambiente. É ainda de realçar que apenas quatro do total dos trabalhos analisados apresenta opções de produção de energia (excluindo os coletores solares – solução que surge muitas vezes associada como alternativa para sistema de aquecimento de águas sanitárias).

Por fim, da análise ao estado da arte, é de salientar que em nenhum dos trabalhos foi considerada a energia embebida como métrica de avaliação das diferentes soluções possíveis. A principal razão para isto acontecer está na dificuldade em obter dados precisos de energia embebida para todos os materiais e componente dos edifícios (Wang *et al.*, 2005).

### 3.2.2 Abordagem aos custos

Segundo a Diretiva EPBD reformulada, os requisitos mínimos de desempenho energético estabelecidos devem alcançar níveis ótimos de rentabilidade. Deste modo, é importante analisar com mais detalhe como pode ser feita esta avaliação, ou seja, que tipo de abordagem aos custos é possível incluir como função-objetivo dos modelos de otimização.

Primeiramente, a consideração mais simples é considerar uma função-objetivo que minimize os custos de investimento – usada por Ascione *et al.* (2016); Hasan (2011); Monteiro *et al.* (2016) e Shao *et al.* (2014). No entanto, está é também a hipótese que apresenta maiores limitações já que muitas vezes o custo de investimento até pode ser rapidamente compensado pelos ganhos (variação nos custos) em termos de melhorias no consumo energético.

Outra opção, é considerar os custos ao longo do ciclo de vida (LCC - ou custos globais). Assim, são incluídos não só os custos de investimento, mas também os custos de manutenção e os custos de operação (gastos com a energia anualizados) ao longo do ciclo de vida do edifício – abordagem escolhida por Antipova *et al.* (2014) (embora sem considerar custos de manutenção); Hamdy *et al.* (2013); Tadeu *et al.* (2016); Wang *et al.* (2005) e Wang *et al.* (2015).

Alternativamente o problema de avaliação de custos pode ser abordado numa perspetiva de valor atual líquido (VAL). No cálculo do VAL são considerados os custos de investimento ( $Inv$ ); os custos de operação e manutenção ( $C_{OM}$ ) - atualizados para cada ano  $i$  do ciclo de vida, segundo a taxa de atualização  $t$  - e o valor residual ( $V_{res}$ ) no final do período analisado - no fim do ciclo de vida económico estimado para o edifício, ano  $n$  (Penna *et al.*, 2015). A sua fórmula é dada pela equação (3-1) e se a parcela relativa aos  $C_{OM}$  vier em valor de custos, então pretender-se-á minimizar o VAL, como em Penna *et al.* (2015). Se, pelo contrário, a referida parcela for referente à variação nos custos (aos ganhos), o objetivo passará a ser o de maximizar o VAL.

$$VAL = -Inv + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{COM_i}{(1+t)^i} + \frac{V_{res}}{(1+t)^n} \quad (3-1)$$

Por outro lado, a minimização de custos pode ser abordada pela minimização do período de *Payback* - período que o investimento demora a ser compensado – como definido em Malatji *et al.* (2013) e Murray *et al.* (2014). O *Payback* é um conceito intimamente ligado com o VAL sendo determinado pelo quociente entre o custo do investimento e o somatório dos ganhos anuais ao longo do ciclo de vida (Murray *et al.*, 2014) – esta fórmula é específica para aplicação como função-objetivo do tipo de problemas em questão.

Finalmente, Eilhauer (2015) desenvolveu a fórmula para a determinação do custo nivelado da tecnologia (LCOT), adaptando a fórmula, já existente, de custo nivelado de energia. Na equação (3-2) é enunciada a fórmula para o cálculo do LCOT, onde  $I_0$  se refere ao investimento inicial,  $A_t$  representa o total de despesas energéticas anuais,  $M_{e,i}$  é o consumo energético no ano  $i$  expresso em  $kWh$  e  $n$  é o período estipulado para o ciclo de vida económico da tecnologia. Esta definição vem facilitar a comparação de sistemas de produção de energia entre si. Contudo, a sua aplicação só faz sentido para tecnologias, quando existem outras variáveis nos problemas, esta definição torna-se difícil de ser empregue.

$$LCOT = \frac{I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{A_t}{(1+t)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{M_{e,i}}{(1+t)^i}} \quad (3-2)$$

### 3.3 Conclusões do capítulo

No momento do planeamento e conceção de edifícios NZEB, o processo de tomada de decisão requer a avaliação de vários objetivos conflitantes: minimização de custos; maximização das poupanças energéticas; maximização do conforto, entre outros. É neste contexto que se torna pertinente a aplicação de otimização multiobjetivo.

Da revisão ao estado da arte relativa ao estudo da aplicação da otimização multiobjetivo na reabilitação ou na conceção de novos edifícios, é possível concluir que a abordagem por metaheurísticas é a preferida para a resolução deste tipo de problemas. Isto é justificado pelo facto desta abordagem ser computacionalmente menos intensiva, revelando-se mais eficiente do que a resolução por via exata para alcançar boas soluções para o problema – já que não é garantido que se alcancem as melhores soluções.

Particularmente dentro desta abordagem, o método mais utilizado é o NSGA-II. Este baseia-se num algoritmo genético mas, como também classifica os cromossomas, alcança mais rapidamente as soluções não-dominadas.

Por fim, a maioria das aplicações dos casos estudados é feita em países europeus e toma em consideração funções-objetivo que visam a determinação de soluções eficientes energeticamente numa lógica de custo-ótimo – o que pode ser motivado pelo que é requerido com a EPBD reformulada.

## 4. MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

No presente capítulo é formulado o modelo de otimização multiobjectivo proposto para a resolução do problema. Deste modo, são definidas as variáveis de decisão, restrições e funções-objetivo. Ainda, é apresentada a metodologia segundo a qual se procederá a aplicação do modelo.

### 4.1 Formulação do modelo

O modelo formulado servirá como ferramenta de apoio à decisão para a definição da meta nZEB para Portugal. Assim, para a criação deste modelo, é essencial perceber o que é considerado pela Diretiva 2010/31/UE, bem como no quadro-metodológico proposto pelo Regulamento Delegado (UE) nº 244/2012 para apoiar a identificação dos requisitos mínimos de desempenho energético requeridos pela EPBD reformulada – conforme exposto na Secção 2.2.1.

Importa mencionar que a Diretiva 2010/31/UE se foca nas necessidades energéticas dos edifícios para o aquecimento e arrefecimento do ambiente; o aquecimento de águas sanitárias; a ventilação e a iluminação fixa. Porém, como uma proposta de estudo serão apenas consideradas as necessidades para aquecimento e arrefecimento do ambiente e aquecimento de águas sanitárias.

Concretamente, para a formulação do modelo de otimização, é necessário definir as variáveis de decisão, as restrições funcionais e as funções-objetivo. Neste sentido, estes aspetos são descritos nas próximas subsecções.

#### 4.1.1 Variáveis de decisão

Tendo por base que as medidas a serem testadas para a identificação dos requisitos mínimos de desempenho energético são medidas que possam ser consideradas no momento da decisão para a conceção ou da reabilitação de um edifício e, partindo dos modelos de otimização multiobjectivo utilizados por Monteiro *et al.* (2016) e Eilhauer (2015), foram estabelecidos os conjuntos das variáveis de decisão apresentadas na Tabela 4.1.

Nas Tabelas A.1 e A.2, presentes no Anexo A, são apresentadas as opções para cada um dos conjuntos de variáveis de decisão. Estas opções constituem as variáveis de decisão reais do modelo.

Das variáveis de decisão, têm-se como variáveis discretas as que correspondem à produção de energia com recurso a um painel solar térmico ou fotovoltaico (uma vez que dependem da área disponível para colocação dos respetivos painéis e dos formatos de painéis existentes no mercado) e a opção de aquecimento do espaço através do aquecedor a óleo, já que podem existir vários aquecedores em toda a habitação. Todas as restantes variáveis de decisão definidas neste modelo são binárias. Isto significa que estas assumirão o valor de 1 ou 0, consoante forem ou não incluídas nas soluções propostas resultantes da execução do modelo.

**Tabela 4.1** - Conjunto de variáveis de decisão do modelo de otimização multiobjetivo.

Conjuntos de variáveis de decisão	Nomenclatura
Mecanismo de aquecimento de águas sanitárias	$x_j^A$
Mecanismo de aquecimento do espaço	$x_j^E$
Mecanismo de arrefecimento do espaço	$u_j$
Material das janelas	$y_j$
Mecanismo de sombreamento	$v_j$
Material de isolamento térmico	$w_j$
Mecanismos de produção de energia	$p_j$

### 4.1.2 Restrições

A determinação do conjunto de soluções ótimas está condicionada por cinco restrições principais, explicadas de seguida.

- **Satisfação das necessidades energéticas para o aquecimento do espaço**

É requerido que os mecanismos usados para o aquecimento do ambiente consigam, pelo menos, satisfazer as necessidades energéticas do mesmo âmbito – esta restrição traduz-se pela inequação representada em (4-1). Deste modo, nesta restrição entram as variáveis de decisão correspondentes às opções para o aquecimento do ambiente ( $x_j^E$ ) e, no outro lado da inequação, as variáveis que terão um impacto na estrutura do edifício - que, conseqüentemente, serão determinantes para as necessidades energéticas do mesmo - tais como, o mecanismo de sombreamento e os materiais usados nas janelas e para o isolamento térmico.

$$\sum_{j \in E} \eta_j^E \cdot Q_j^E \cdot x_j^E \geq Q_i \quad (4-1)$$

Nesta restrição,  $\eta_j^E$  e  $Q_j^E$  representam a eficiência e a energia consumida, respetivamente, para o aparelho de aquecimento de espaço  $x_j^E$  e  $Q_i$  as necessidades energéticas para aquecimento do espaço (determinadas segundo as equações definidas no Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013).

A energia útil necessária para aquecimento do espaço durante um ano (em  $kWh/ano$ ),  $Q_i$ , é calculada através da equação (4-2). Nesta equação,  $N_{ic}$  corresponde às necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do edifício em  $kWh/(m^2 \cdot ano)$  e  $A_c$  representa a área interior útil de pavimento do edifício (ou fração de edifício - conforme a aplicação do estudo) medida pelo interior em  $m^2$ .

$$Q_i = N_{ic} \times A_c \quad (4-2)$$

Por sua vez, as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do edifício são calculadas através da equação (4-3), onde  $Q_{gu,i}$ ,  $Q_{tr,i}$  e  $Q_{ve,i}$ , são medidos em  $kWh$  e correspondem, respetivamente, aos ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento resultantes dos ganhos solares

através dos vãos envidraçados, da iluminação, dos equipamentos e dos ocupantes, à transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento através da envolvente dos edifícios e à transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento.

$$N_{ic} = \frac{Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i}}{A_c} \quad (4-3)$$

Já a transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento através da envolvente dos edifícios é dada pela equação (4-4) – sendo  $GD$  o número de graus-dias de aquecimento especificados para cada região NUTS III (em  $^{\circ}C \cdot dia$ ) e  $H_t$  o coeficiente global de transferência de calor por transmissão (em  $W/^{\circ}C$ ).

$$Q_{tr,i} = 0,024 \times GD \times H_t \quad (4-4)$$

O coeficiente global de transferência de calor por transmissão calcula-se pela equação (4-5) e depende das variáveis de decisão correspondentes ao material das janelas ( $y_j$ ) e do isolamento do edifício ( $v_j$ ). Nesta expressão  $U_{p,j}$  é o coeficiente de transmissão térmica do material de isolamento  $j$ ,  $U_{j,j}$  o coeficiente de transmissão térmica do material das janelas  $j$  e  $U_c$  o coeficiente de transmissão térmica do chão (em  $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ );  $A_p$ ,  $A_t$ , e  $A_j$  correspondem às áreas (em  $m^2$ ) de paredes exteriores do edifício (ou fração), teto e janelas exteriores, respetivamente.

$$H_t = \left( \sum_{j \in V} U_{p,j} \cdot v_j \right) \times (A_p + A_t) + \left( \sum_{j \in Y} U_{j,j} \cdot y_j \right) \times A_j + U_c \times A_c \quad (4-5)$$

A transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento é dada pela equação (4-6), correspondendo o  $R_{ph}$  à taxa nominal de renovação do ar interior, em  $h^{-1}$ , e o  $P_d$  é o pé direito do edifício (ou fração) medido em  $m$ .

$$Q_{ve,i} = 0,024 \times GD \times 0,34 \times R_{ph} \times A_c \times P_d \quad (4-6)$$

Os ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento são calculados pela equação (4-7) onde  $\eta_i$  corresponde ao fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento e  $Q_{g,i}$  aos ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento (em  $kWh$ ).

$$Q_{gu,i} = \eta_i \times Q_{g,i} \quad (4-7)$$

Para a determinação do fator de utilização dos ganhos térmicos, é necessário calcular, primeiramente, o rácio entre ganhos térmicos brutos e transferências de calor por transmissão e ventilação na estação de aquecimento ( $\gamma_i$ ) conforme explicitado na equação (4-8). Consoante o valor correspondente para este rácio, assim se deve optar por uma das equações (4-9), (4-10) ou (4-11) para o cálculo do  $\eta_i$ . Nestas equações o  $\alpha$  é um parâmetro que traduz a influência da classe de inércia térmica, em  $W/^{\circ}C$ .

$$\gamma_i = \frac{Q_{g,i}}{Q_{tr,i} + Q_{ve,i}} \quad (4-8)$$

Se  $\gamma_i \neq 1, \gamma_i > 0$  :

$$\eta_i = \frac{1 - \gamma_i^a}{1 - \gamma_i^{a+1}} \quad (4-9)$$

Se  $\gamma_i = 1$  :

$$\eta_i = \frac{a}{a + 1} \quad (4-10)$$

Se  $\gamma_i < 0$  :

$$\eta_i = \frac{1}{\gamma_i} \quad (4-11)$$

Os ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento são calculados pela equação (4-12), correspondendo  $Q_{int,i}$  aos ganhos térmicos associados a fontes internas de calor, na estação de aquecimento e  $Q_{sol,i}$  aos ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos vãos envidraçados, na estação de aquecimento, ambos em  $kWh$ .

$$Q_{g,i} = Q_{int,i} + Q_{sol,i} \quad (4-12)$$

No cálculo dos ganhos térmicos associados a fontes internas de calor expresso pela equação (4-13),  $q_{int}$  representa os ganhos térmicos internos médios por unidade de superfície, iguais a  $4 \text{ W/m}^2$  (valor definido no Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013), e  $M$  a duração da estação de aquecimento, em meses.

$$Q_{int,i} = 0,72 \times q_{int} \times M \times A_c \quad (4-13)$$

Para a determinação dos ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos vãos envidraçados, recorre-se à equação (4-14) sendo  $G_{sul}$  o valor médio mensal de energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a Sul, durante a estação de aquecimento, em  $kWh/(m^2 \cdot m\acute{e}s)$ ,  $X_i$  o fator de orientação dos vãos envidraçados para as diferentes exposições,  $F_{s,i}$  o fator de obstrução do vão envidraçado na estação de aquecimento e  $A_s$  a área efetiva coletora de radiação solar do vão envidraçado, em  $m^2$ .

$$Q_{sol,i} = G_{sul} \times X_i \times F_{s,i} \times A_s \times M \quad (4-14)$$

O fator de obstrução do vão envidraçado é calculado pela equação (4-15). Nesta equação,  $F_{h,i}$  é o fator de sombreamento do horizonte por obstruções exteriores ao edifício ou por outros elementos do edifício na estação de aquecimento e  $F_o F f_j$  é o fator de sombreamento resultado da combinação da obstrução por elementos horizontais e verticais sobrejacentes ao envidraçado, compreendendo palas e varandas característico da variável de decisão  $z_j$  (mecanismo de sombreamento) respetiva.

$$F_{s,i} = F_{h,i} \times \sum_{j \in Z} F_o F f_j \cdot z_j \quad (4-15)$$

Por último, a área efetiva coletora de radiação solar do vão envidraçado é calculada a partir da equação (4-16), onde  $F_g$  é a fração envidraçada do vão envidraçado e  $g_i$  o fator solar de inverno.

$$A_s = A_j \times F_g \times g_i \quad (4-16)$$

▪ **Satisfação das necessidades energéticas para o arrefecimento do espaço**

De forma semelhante à restrição anterior, é igualmente requerida a satisfação das necessidades energéticas para o arrefecimento do espaço – conforme explicitado pela inequação (4-17).

$$\sum_{j \in U} \eta_j^U \cdot Q_j^U \cdot u_j \geq Q_v \quad (4-17)$$

Nesta inequação,  $\eta_j^U$  e  $Q_j^U$  representam a eficiência e a energia consumida, respetivamente, para o aparelho de arrefecimento de espaço  $u_j$  e  $Q_v$  as necessidades energéticas para o arrefecimento do espaço durante um ano (determinadas segundo as equações definidas no Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013).

As necessidades energéticas para o arrefecimento do espaço, por sua vez, são calculadas pela fórmula expressa em (4-18) e são expressas em *kWh/ano*. Aqui,  $N_{vc}$  corresponde às necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento do edifício (ou fração), em *kWh/(m².ano)*.

$$Q_v = N_{vc} \times A_c \quad (4-18)$$

Particularmente, as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento são determinadas pela equação (4-19), sendo  $\eta_v$  o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento e  $Q_{g,v}$ , os ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento, em *kWh*.

$$N_{vc} = \frac{(1 - \eta_v) \times Q_{g,v}}{A_c} \quad (4-19)$$

A determinação do fator de utilização dos ganhos térmicos requer o cálculo do rácio entre ganhos térmicos brutos e transferências de calor por transmissão e ventilação na estação de arrefecimento,  $\gamma_v$ , dado pela equação (4-20). Nesta equação,  $Q_{g,v}$  são os ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento,  $Q_{tr,v}$  a transferência de calor por transmissão na estação de arrefecimento através da envolvente dos edifícios e  $Q_{ve,v}$  a transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento – estando todos os valores na mesma unidade, *kWh*.

$$\gamma_v = \frac{Q_{g,v}}{Q_{tr,v} + Q_{ve,v}} \quad (4-20)$$

Assim, conforme o valor do rácio, diferente será a equação selecionada para o cálculo do fator de utilização de ganhos térmicos, tal como explicitado pelas equações (4-21), (4-22) e (4-23).

Se  $\gamma_v \neq 1, \gamma_v > 0$  :

$$\eta_v = \frac{1 - \gamma_v^a}{1 - \gamma_v^{a+1}} \quad (4-21)$$

Se  $\gamma_v = 1$  :

$$\eta_v = \frac{a}{a + 1} \quad (4-22)$$

Se  $\gamma_v < 0$  :

$$\eta_v = \frac{1}{\gamma_v} \quad (4-23)$$

A transferência de calor por transmissão na estação de arrefecimento é dada pela equação (4-24) onde  $\theta_{v,ref}$  representa a temperatura de referência para o cálculo das necessidades de energia na estação de arrefecimento, igual a 25°C - segundo o Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013.  $\theta_{v,ext}$  é a temperatura média do ar exterior para a estação de arrefecimento em °C e  $L_v$  a duração da estação de arrefecimento, igual a 2.928 horas (valor definido no Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013).

$$Q_{tr,v} = H_t \times (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \times L_v / 1000 \quad (4-24)$$

Já a transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento é calculada pela equação (4-25).

$$Q_{ve,v} = 0,34 \times R_{ph} \times A_c \times P_d \times (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \times L_v / 1000 \quad (4-25)$$

Os ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento são calculados pela equação (4-26), somando-se os ganhos térmicos associados a fontes internas de calor, na estação de arrefecimento ( $Q_{int,v}$ ) e os ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos vãos envidraçados, na estação de arrefecimento ( $Q_{sol,v}$ ), ambos expressos em *kWh*.

$$Q_{g,v} = Q_{int,v} + Q_{sol,v} \quad (4-26)$$

Destes, os ganhos térmicos associados a fontes internas de calor são determinados pela equação (4-27).

$$Q_{int,v} = q_{int} \times A_c \times L_v / 1000 \quad (4-27)$$

Os ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos vãos envidraçados são calculados a partir da equação (4-28), onde  $G_{sol,j}$  e  $G_{sol,p}$  representam a energia solar média incidente numa janela e numa parede (respetivamente) em *kWh/m<sup>2</sup>*, consoante a sua orientação, durante toda a estação de arrefecimento;  $F_{s,v}$  é o fator de obstrução do vão envidraçado na estação de arrefecimento;  $\alpha$  o coeficiente de absorção de radiação solar da superfície do elemento da envolvente opaca e  $R_{se}$  a resistência térmica superficial exterior igual a 0,04 *W/(m<sup>2</sup>.°C)* – assente no Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013.

$$Q_{sol,v} = G_{sol,j} \times F_{s,v} \times A_j \times F_g \times g_v + G_{sol,p} \times F_{s,v} \times \alpha \times \left( \sum_{j \in V} \mathbf{u}_{p,j} \cdot \mathbf{v}_j \right) \times (A_p + A_t) \times R_{se} \quad (4-28)$$

Por fim, o fator de obstrução do vão envidraçado na estação de arrefecimento calcula-se através da equação (4-29), sendo  $F_{h,v}$  o fator de sombreamento do horizonte por obstruções exteriores ao edifício ou por outros elementos do edifício na estação de arrefecimento – valor que difere do correspondente para a estação de aquecimento.

$$F_{s,v} = F_{h,v} \times \sum_{j \in Z} F_o F f_j \cdot z_j \quad (4-29)$$

▪ **Satisfação das necessidades energéticas para o aquecimento de águas sanitárias**

Outra restrição inerente às anteriores refere-se à energia útil necessária para a preparação de AQS. Neste sentido, os aparelhos existentes que permitem o aquecimento de águas sanitárias têm de ser capazes de produzir a energia necessária para satisfazer as necessidades energéticas da mesma natureza – tal como representado pela inequação (4-30).

$$\sum_{j \in A} \eta_j^A \cdot Q_j^A \cdot x_j^A \geq Q_a \quad (4-30)$$

Para esta restrição,  $\eta_j^A$  e  $Q_j^A$  correspondem à eficiência e à energia consumida, respetivamente, para o aparelho de preparação de AQS  $x_j^A$  e  $Q_a$  às necessidades energéticas para aquecimento de águas sanitárias durante um ano (determinadas segundo as equações definidas no Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013).

Mais concretamente, as necessidades energéticas para aquecimento de águas sanitárias durante um ano podem ser calculadas segundo a equação (4-31), onde  $M_{AQS}$  representa o consumo médio diário de referência de AQS, em  $l$ ;  $\Delta T$  o aumento de temperatura necessário para a preparação das AQS e que toma o valor de referência de 35°C (Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013) e  $n_d$  o número anual de dias de consumo de AQS de edifícios residenciais que se considera de 365 dias (Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013).

$$Q_a = \frac{M_{AQS} \times 4187 \times \Delta T \times n_d}{3600000} \quad (4-31)$$

O consumo médio diário de referência de AQS é dado pela equação (4-32), sendo  $n$  o número convencional de ocupantes da fração autónoma e  $f_{eh}$  um fator de eficiência hídrica.

$$M_{AQS} = 40 \times n \times f_{eh} \quad (4-32)$$

▪ **Limitação da área disponível para colocação de painéis solares (térmico e fotovoltaico)**

Outro fator condicionante é a área disponível para a colocação de painéis solares (quer sejam térmicos ou fotovoltaicos). Esta estará limitada pelas características do edifício e afetará não só o resultado das variáveis de decisão que implicam o recurso a um painel solar térmico, mas também o valor de produção de energia através do painel fotovoltaico. Desta forma, a partir das variáveis de decisão definidas para o modelo, é possível descrever esta restrição através da inequação (4-33), onde  $x_6^A$  é a área do painel solar térmico com sistema de circulação forçada,  $x_7^A$  é a área do painel solar térmico com sistema termossifão,  $p_1$  a área ocupada pelo painel solar fotovoltaico e, por fim,  $Atd$  a área disponível no telhado do edifício para a colocação de painéis solares fotovoltaicos.

$$x_6^A + x_7^A + p_1 \leq Atd \quad (4-33)$$

No entanto, é de salientar que, do ponto de vista prático, não fará sentido a utilização dos dois tipos de painéis solares térmicos em simultâneo.

- **Número de opções passíveis de serem postas em prática**

Para cada um dos conjuntos de variáveis de decisão que requerem uma alteração na estrutura física do edifício - o material das janelas, o mecanismo de sombreamento e o material de isolamento térmico - só poderá ser selecionada uma opção do total das disponíveis, o que é definido pelas inequações (4-34), (4-35) e (4-36), respetivamente.

$$\sum_{j \in Y} y_j = 1 \quad (4-34)$$

$$\sum_{j \in V} v_j = 1 \quad (4-35)$$

$$\sum_{j \in W} w_j = 1 \quad (4-36)$$

Da mesma forma, apenas um dos aparelhos disponíveis para preparação de AQS pode ser escolhido para desempenhar essa função, sendo que a sua escolha é obrigatória ainda que o painel solar térmico seja capaz de satisfazer as necessidades anuais de aquecimento de águas sanitárias. Apesar de ser possível que um painel solar térmico, em termos médios, produza a energia necessária para satisfazer as necessidades de AQS, o facto de os picos do consumo não serem necessariamente os mesmos que os da produção ao longo do ano requer a existência de um aparelho para complementar a sua ação – equação (4-37).

$$\sum_{j=1}^5 x_j^A = 1 \quad (4-37)$$

No que concerne à energia produzida pelos painéis solares térmicos, é necessário impor que a mesma seja no máximo igual às necessidades energéticas para a preparação de AQS,  $Q_a$ , para evitar um sobredimensionamento dos painéis solares térmicos – definidos pelas variáveis de decisão  $x_6^A$  e  $x_7^A$ . Esta restrição é traduzida pela inequação (4-38), sendo  $Eppst_6$  e  $Eppst_7$  a energia que o painel solar térmico é capaz de produzir anualmente em

$$Eppst_6 \cdot x_6^A + Eppst_7 \cdot x_7^A \leq Q_a \quad (4-38)$$

- **Restrição imposta pela legislação**

Existe ainda uma restrição adicional - inequação (4-39) - imposta no Despacho N.º 15793-K/2013 relativo aos parâmetros térmicos, que refere que o produto entre o fator de orientação ( $X_i$ ) e o fator de obstrução dos vãos envidraçados ( $F_h \times F_o F_f$ ) nunca deve ser inferior a 0,27.

$$X_i \times F_h \times \sum_{j \in Z} F_o F_f j \cdot z_j \geq 0,27 \quad (4-39)$$

### 4.1.3 Funções-objetivo

Neste modelo, serão consideradas duas funções-objetivo: a minimização dos custos ao longo do ciclo de vida e a minimização do balanço energético, já que a sua combinação permite avaliar as diversas variáveis de decisão segundo uma lógica de custo-ótimo – como definido pela EPBD reformulada. Portanto, de forma mais concreta, este será um modelo de otimização biobjetivo.

- **Minimização do balanço energético**

A primeira função-objetivo refere-se à minimização do balanço energético calculado pela diferença entre a energia consumida e a energia produzida, conforme expresso em (4-40). Este balanço energético é calculado numa base anual e a partir de valores já convertidos para energia primária, como proposto pela EPBD reformulada.

Assim, a parcela referente ao consumo energético é dada pela soma do consumo de energia primária decorrente da aplicação dos mecanismos de aquecimento e arrefecimento do ambiente e de aquecimento de águas sanitárias,  $(Qep_j^E, Qep_j^U, Qep_j^A)$ , respetivamente), em  $kWh_{ep}/ano$ . E, por outro lado, a parcela correspondente à produção de energia é dada pela soma da energia produzida pelos painéis solares térmicos  $(Pep_6^A + Pep_7^A)$  e fotovoltaico  $(Pep_1^P)$ , em  $kWh_{ep}/(m^2 \cdot ano)$ .

(4-40)

$$f_1 = \min\left(\sum_{j=1}^5 Qep_j^A \cdot x_j^A + \sum_{j \in E} Qep_j^E \cdot x_j^E + \sum_{j \in U} Qep_j^U \cdot u_j - (Pep_6^A \cdot x_6^A + Pep_7^A \cdot x_7^A + Pep_1^P \cdot p_1)\right)$$

Com maior detalhe o consumo de energia primária é calculado para cada um dos aparelhos conforme a equação (4-41). Nesta expressão  $fpue$  e  $fpuc$  são os fatores de conversão de energia final para energia primária para a eletricidade (igual a  $2,5 kWh_{ep}/kWh$  independentemente da sua origem, renovável ou não) e para combustíveis sólidos, líquidos e gasosos não renováveis (igual a  $1 kWh_{ep}/kWh$ ), respetivamente - Despacho (extrato) nº15793-D/2013.  $Q_e$ ,  $Q_{gn}$ ,  $Q_l$  e  $Q_p$  são os consumos respetivos de eletricidade, gás natural, lenha e *pellets*, em  $kWh/ano$ .

$$Qep = fpue \times Q_e + fpuc \times (Q_{gn} + Q_l + Q_p) \quad (4-41)$$

- **Minimização dos custos do ciclo de vida**

A segunda função-objetivo é a da minimização da soma dos custos ao longo do ciclo de vida - atualizados para cada ano segundo uma taxa de desconto. De forma geral, esta função-objetivo é descrita como em (4-42), correspondendo  $LCC_j^A$ ,  $LCC_j^E$ ,  $LCC_j^U$  ao LCC do aparelho de aquecimento de águas sanitárias  $j$ , do aparelho de aquecimento  $j$  e do aparelho de arrefecimento de espaço  $j$ , por ordem respetiva;  $LCC_1^P$  ao LCC do painel solar fotovoltaico e  $Cinv_j^y$ ,  $Cinv_j^z$ ,  $Cinv_j^w$  aos custos de investimento no material das janelas  $j$ , no mecanismo de sombreamento  $j$  e no material de isolamento térmico  $j$ , respetivamente.

$$f_2 = \min\left(\sum_{j \in A} LCC_j^A \cdot x_j^A + \sum_{j \in E} LCC_j^E \cdot x_j^E + \sum_{j \in U} LCC_j^U \cdot u_j + LCC_1^p \cdot p_1 + A_j \times \sum_{j \in Y} Cinv_j^y \cdot y_j + A_j \times \sum_{j \in V} Cinv_j^v \cdot v_j + (A_p + A_t) \times \sum_{j \in W} Cinv_j^w \cdot w_j\right) \quad (4-42)$$

Importa realçar que no caso do material das janelas, do mecanismo de sombreamento e do material de isolamento térmico foi considerado que não é necessário incorrer em custos de manutenção ou substituição no tempo estimado para o cálculo do ciclo de vida.

Para o cálculo do LCC de cada aparelho recorre-se à equação (4-43), ou seja, somam-se os custos de investimento (*Cinv*) requeridos para a sua instalação inicial, os custos da sua substituição (*Cs*) e os custos de operação (*Co*). Note-se que, nesta expressão, foram ignorados os custos de manutenção já que é difícil a sua previsão. Todavia, esta é uma parcela com pouca influência no que é o objetivo principal do modelo de otimização – o da seleção das opções mais viáveis.

$$LCC = Cinv + Cs + Co \quad (4-43)$$

Mais especificamente, os custos de substituição são calculados através da equação (4-44). Para a sua determinação foi considerada a substituição completa do aparelho a meio do seu ciclo de vida. Nesta expressão, *i* é a taxa de desconto real – sugerida no RD 244/2012 como sendo igual a 3% - e *t* é o período do ciclo de vida – igual a 30 anos, segundo a recomendação para os edifícios residenciais expressa no Anexo I do RD 244/2012.

$$Cs = \frac{Cinv}{(1+i)^{t/2}} \quad (4-44)$$

Já os custos de operação de cada aparelho resultam do cálculo do seu consumo energético ao longo do prazo do ciclo de vida segundo a equação (4-45), sugerida em Hamdy *et al.* (2013). Aqui, *ae* é um fator de desconto que tem em consideração a evolução do preço da energia e *Cet* representa os custos energéticos totais (relativos ao consumo de eletricidade, biomassa, *pellets*, lenha ou gás natural, consoante o aparelho).

$$Co = ae \times Cet \quad (4-45)$$

O fator de desconto *ae* é calculado a partir da expressão (4-46) onde *i<sub>e</sub>* é a taxa de desconto real tendo em consideração o fator de evolução dos preços da energia.

$$ae = \frac{1 - (1+i_e)^{-t}}{i_e} \quad (4-46)$$

No cálculo da taxa de desconto real *i<sub>e</sub>* dado pela equação (4-47), *e* corresponde ao fator de evolução do preço da energia – tomando o valor de 2% como proposto em Hamdy *et al.* (2013).

$$i_e = \frac{i - e}{1 + e} \quad (4-47)$$

Ainda, é importante mencionar que no caso particular do cálculo dos custos com eletricidade (*Ce*) é considerada a poupança inerente ao consumo da energia produzida localmente através do painel solar

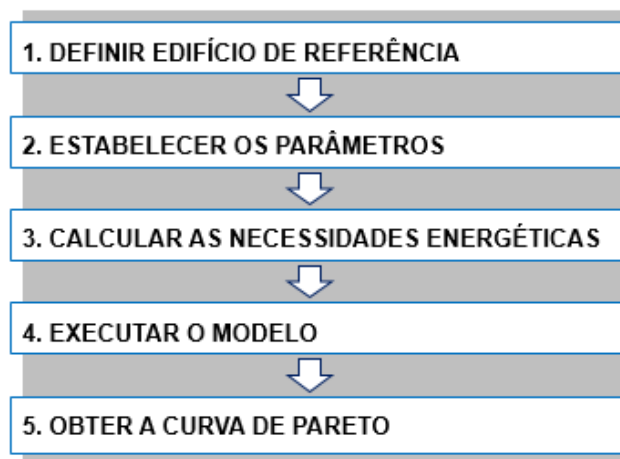
fotovoltaico. Assim, este cálculo é dado pela equação (4-48), onde  $p_e$  corresponde ao preço da eletricidade em €/kWh.

$$C_e = p_e \times (Q_e - P_e p_1^p \cdot p_1) \quad (4-48)$$

## 4.2 Metodologia de aplicação do modelo

O modelo formulado é indicado para a reabilitação de edifícios já existentes. No entanto, poderá também ser aplicado para a construção de um edifício de raiz. Neste caso, terão de ser excluídas, das variáveis de decisão, as opções para o material das janelas, o mecanismo de sombreamento e o material de isolamento térmico consideradas nas Tabelas A.1 e A.2 como “originais do edifício”. Além disso, será também necessário o conhecimento à priori das áreas correspondentes à estrutura física do edifício que se planeia construir, bem como a sua localização e orientação das suas janelas e paredes exteriores.

Tendo por base a aplicação do modelo de otimização para a reabilitação de um edifício, a metodologia a seguir para a aplicação do modelo de otimização formulado encontra-se representada na Figura 4.1.



**Figura 4.1** - Metodologia para a aplicação do modelo de otimização multiobjetivo.

Primeiramente, define-se o edifício de referência, representativo da funcionalidade e da localização geográfica, incluindo condições climáticas interiores e exteriores - conforme proposto pelo quadro-metodológico do RD 244/2012. Nesta etapa, é de salientar que o foco deste trabalho de investigação será o setor residencial. Por esta razão, o edifício de referência será uma casa de habitação.

Em segundo lugar, estabelecem-se os parâmetros característicos das variáveis de decisão a considerar no modelo. Estes incluem:

- As características de desempenho de cada mecanismo de aquecimento e arrefecimento do espaço, de aquecimento de águas sanitárias e de produção de energia;
- Os coeficientes de transmissão térmica das janelas e dos materiais de isolamento;

- Os fatores de obstrução solar resultantes da aplicação de cada um dos mecanismos de sombreamento;
- Os custos de investimento para cada uma das variáveis de decisão;
- Os custos de energia.

Numa terceira etapa, havendo sido definido o edifício de referência, proceder-se-á ao cálculo das suas necessidades energéticas.

Seguidamente, é executado o modelo, através de um dos métodos de otimização referido na Subsecção 3.2.1, tendo sido fornecidos os dados de entrada estabelecidos na segunda etapa.

Por fim, da execução do modelo, serão obtidas várias soluções. O conjunto de soluções que otimiza as funções-objetivo formará uma Curva de Pareto (conceito explorado em 3.1).

### **4.3 Conclusões do Capítulo**

O modelo de otimização definido procura minimizar, simultaneamente, os custos globais e o balanço energético do edifício (diferença entre o consumo e a produção energética). Assim, este é um modelo biojetivo - um caso particular dos modelos multiobjectivo.

A formulação deste modelo foi baseada nos modelos desenvolvidos por Monteiro *et al.* (2016) e Eilhauer (2015). Deste modo, e com o intuito de diminuir a complexidade do modelo, para a definição das variáveis de decisão, restrições e funções-objetivo foram apenas consideradas as necessidades de energia para o aquecimento e arrefecimento do ambiente e o aquecimento de águas sanitárias na definição.

A aplicação do modelo formulado pode ser resumida em cinco etapas distintas: definição do edifício de referência; estabelecimento de parâmetros; cálculo das necessidades energéticas; execução do modelo e obtenção do conjunto de soluções ótimas que formam uma Curva de Pareto.

Partindo das soluções obtidas, será então possível avançar para o passo seguinte da metodologia seguida no presente trabalho de investigação – o de análise e discussão de resultados.

## 5. CASO DE ESTUDO

Neste capítulo é descrito o caso de estudo com base nas etapas identificadas para a metodologia de aplicação do modelo (Figura 4.1). Como tal, são, primeiramente, definidos os dados de entrada do modelo, através da identificação do edifício de referência e dos parâmetros característicos das variáveis de decisão. De seguida, são apresentadas as necessidades energéticas atuais da habitação que servirá de referência. Após esta etapa, procede-se à aplicação do modelo desenvolvido. Por fim, é feita uma análise dos resultados, permitindo retirar recomendações para a implementação dos edifícios nZEB em Portugal.

### 5.1 Definição do edifício de referência

Para a aplicação do modelo desenvolvido, foi definido um edifício de referência situado em Lisboa e representativo dos edifícios residenciais com a mesma localização. Desta forma, a determinação das suas características foi feita a partir dos valores médios resultantes da análise dos dados dos Censos portugueses de 2011.

Os dados obtidos para a área do município de Lisboa (código geográfico 1106) foram tratados segundo as fórmulas desenvolvidas por Ximenes (2015) e incluídas no Anexo B. Assim, foi possível determinar que o edifício residencial típico em Lisboa tem as características definidas na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1** - Características do edifício de referência localizado no município de Lisboa.

Edifício de referência localizado no município de Lisboa	
Número de pisos	3 pisos
Número de alojamentos por piso	2 alojamentos
Número de pessoas por alojamento	2,3 pessoas
Área de chão	196,3 m <sup>2</sup>
Área de telhado	196,3 m <sup>2</sup>
Área de paredes exteriores	437,1 m <sup>2</sup>
Área de janelas exteriores	131,1 m <sup>2</sup>

Uma vez que as variáveis de decisão do modelo incluem opções para a preparação de AQS, aquecimento e arrefecimento de espaço (que por norma, são decididas pelos proprietários de cada habitação), a aplicação do mesmo será feita a apenas um alojamento do edifício de referência anteriormente definido – sendo possível que os resultados sejam posteriormente extrapolados para todo o edifício. Por conseguinte, os dados de entrada a utilizar na execução do modelo são os estipulados na Tabela 5.2.

Importa realçar que, para a determinação da área de telhado disponível para a aplicação de painéis solares, *Atd*, foi considerado que a área total do telhado do edifício é dividida igualmente por cada uma das seis habitações. Além disso, considerou-se que o telhado é inclinado e apenas a área orientada a sul pode ser aproveitada para esse fim (o que se traduz em, sensivelmente, metade da área calculada).

**Tabela 5.2** - Características do alojamento e respetivos parâmetros para a aplicação do modelo.

Parâmetro do modelo		Valor
Área de chão	$A_c$	98,1 m <sup>2</sup>
Área de janelas exteriores	$A_j$	21,9 m <sup>2</sup>
Área de paredes exteriores (excluindo janelas)	$A_p$	50,9 m <sup>2</sup>
Área de telhado	$A_t$	0 m <sup>2</sup>
Área de telhado disponível para aplicação de painéis solares	$A_{td}$	16,4 m <sup>2</sup>
Número convencional de ocupantes	$n$	3 pessoas

Ainda, é importante referir que o alojamento tido como de referência situa-se no piso intermédio do edifício, pelo que não está em contacto com o telhado nem com o chão do mesmo – razão pela qual  $A_t = 0 \text{ m}^2$ . Por conseguinte, consideram-se as trocas de calor apenas com o exterior do edifício, isto é, dentro do edifício o sistema é adiabático, não havendo trocas de calor entre os pisos. Deste modo, para efeitos de cálculo, na resolução do modelo consideram-se os coeficientes de transmissão térmica do chão e do telhado, igualmente, nulos ( $U_c = U_t = 0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ).

### 5.1.1 Outros parâmetros característicos do edifício de referência

Tendo sido estabelecidas as características físicas do edifício de referência, foram determinados os parâmetros que definem as suas condições térmicas e climáticas e outros fatores necessários à aplicação do modelo. Estes encontram-se nas Tabelas 5.3 e 5.4, com a indicação da respetiva fonte.

**Tabela 5.3** - Parâmetros característicos do edifício de referência.

Parâmetro do modelo		Valor	Unidade	Fonte(s)
Parâmetro que traduz a influência da classe de inércia térmica	$a$	2,6	W/°C	Despacho n.º 15793-K/2013, p. 35088-(68) - Edifícios com inércia térmica média
Fator de eficiência hídrica	$f_{eh}$	1	-	Portaria nº 349-B/2013, p. 6624-(21)
Fração envidraçada do vão envidraçado	$F_g$	0,7	-	Despacho (Extrato) n.º 15793-E/2013, p. 35088-(19) - Regras de simplificação
Fator de sombreamento do horizonte, na estação de aquecimento	$F_{h,i}$	0,6235	-	Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, p. 35088-(76) e Quercus (2008), p. 39 - Zona Climática I1V2
Fator de sombreamento do horizonte, na estação de arrefecimento	$F_{h,v}$	1	-	Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, p. 35088-(75)
Fator de sombreamento por elementos horizontais e verticais	$F_o, F_f$	0,9	-	Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, p. 35088-(78) – Não existem palas
Número de graus-dias de aquecimento	$GD$	1.071	°C	Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, p. 35088-(29) - Grande Lisboa

**Tabela 5.4 -** Parâmetros característicos do edifício de referência (continuação).

Parâmetro do modelo	Valor	Unidade	Fonte(s)	Parâmetro do modelo
Fator solar do vão envidraçado da estação de aquecimento	$g_i$	0,675	-	Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, $g_i = F_{w,i} \times g_{\pm,vi}$ , p. 35088-(74) onde $F_{w,i} = 0,9$ , p. 35088-(78) e $g_{\pm,vi} = 0,75$ , p. 35088-(72) - Vidro duplo incolor
Fator solar do vão envidraçado da estação de arrefecimento	$g_v$	0,6248	-	Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, $g_i = F_{w,v} \times g_{\pm,vi}$ , p. 35088-(74) onde $F_{w,v}$ p. 35088-(78) - Vidro plano duplo e Quercus (2008), p. 39 - Zona Climática I1V2
Energia solar média incidente numa janela, consoante a sua orientação, durante toda a estação de arrefecimento	$G_{solj}$	432,65	$kWh/m^2$	Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, p. 35088-(31) - Grande Lisboa e Quercus (2008), p. 39 - Zona Climática I1V2
Energia solar média incidente numa parede, consoante a sua orientação, durante toda a estação de arrefecimento	$G_{solp}$	419,38	$kWh/m^2$	Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, p. 35088-(31) – Média para a Grande Lisboa
Valor médio mensal de energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a Sul, durante a estação de aquecimento, por unidade de superfície	$G_{sul}$	150	$\frac{kWh}{(m^2 \cdot mês)}$	Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, p. 35088-(29) - Grande Lisboa
Duração média da estação convencional de aquecimento	$M$	5,3	meses	Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, p. 35088-(29) - Grande Lisboa
Taxa nominal de renovação do ar interior	$R_{ph,i}$	1,021	$h^{-1}$	Censos 2011 - Ano de construção de edifícios clássicos; e Ximenes (2015), p.30 (Média ponderada)
Coeficiente de transmissão térmica das janelas	$U_j$	3,9967	$\frac{W}{(m^2 \cdot ^\circ C)}$	Censos 2011 - Ano de construção de edifícios clássicos; e Ximenes (2015), p.29 (Média ponderada)
Coeficiente de transmissão térmica das paredes	$U_p$	1,7272	$\frac{W}{(m^2 \cdot ^\circ C)}$	Censos 2011 - Ano de construção de edifícios clássicos; e Ximenes (2015), p.29 (Média ponderada)
Fator de orientação para as diferentes exposições	$X_i$	0,6185	-	Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013, p. 35088-(44) e Quercus (2008), p. 39 - Zona Climática I1V2
Coeficiente de absorção de radiação solar da superfície do elemento da envolvente opaca	$\alpha$	0,4	-	Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013, p. 35088-(67) - Cor clara
Temperatura média do ar exterior para a estação de arrefecimento	$\theta_{v,ext}$	21,7	$^\circ C$	Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, p. 35088-(31) – Grande Lisboa

## 5.2 Parâmetros para o modelo

Para além dos parâmetros já definidos, para que seja possível a execução do modelo, é ainda necessário determinar os dados para o cálculo da função de custos e os parâmetros característicos de cada uma das variáveis de decisão. Desta forma, estes são apresentados nas próximas subsecções.

### 5.2.1 Preços da energia

Os preços atuais de energia foram retirados de Solius (2014) apresentando os valores expostos na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5** - Preço atual de cada vetor energético em €/kWh.

Tipo de energia	Preço (€/kWh)
Eletricidade	0,1780
Gás Natural	0,0900
Lenha	0,0417
Pellets	0,0567

### 5.2.2 Parâmetros característicos dos mecanismos de preparação de AQS, aquecimento e arrefecimento de espaço

Os parâmetros energéticos relativos aos mecanismos de preparação de AQS, aquecimento e arrefecimento de espaço foram obtidos a partir da informação disponível nas respetivas folhas de dados técnicos dos produtos apresentadas pelas empresas que os comercializam – Vulcano, Junkers, SolarWaters, LeroyMerlin, Worten e Marla. Ainda, consideraram-se os valores de energia produzida pelos painéis solares térmicos indicados por Eilhauer (2015) para Lisboa.

Por sua vez, os custos dos mecanismos foram conseguidos a partir de KuntoKusta ou dos respetivos websites das empresas referidas.

Assim, a Tabela 5.6 sintetiza os parâmetros característicos dos mecanismos de preparação de AQS, com a indicação da variável de decisão (VD) correspondente para o modelo a programar. Importa, no entanto, realçar que para a resolução do modelo foi considerado que cada uma das opções, por si só, consegue produzir toda a energia necessária para a satisfação das necessidades de aquecimento de águas sanitárias, bastando para tal que o número de horas de funcionamento do aparelho esteja ajustado às necessidades energéticas. Aqui, é de realçar que a opção correspondente à caldeira de biomassa pode não fazer sentido aplicar-se apenas a um alojamento de um edifício.

Já os parâmetros relativos aos mecanismos de aquecimento de espaço encontram-se na Tabela 5.7. Aqui, é de notar que, tal como assumido, para os aparelhos de aquecimento de águas sanitárias, foi considerado que tanto a caldeira a gás natural (opção que partilha a função de preparação de AQS), como o aparelho de ar condicionado, podem satisfazer totalmente as necessidades de aquecimento sem a necessidade de existirem outros aparelhos simultaneamente.

Além disso, assumiu-se que podem existir vários aquecedores a óleo com o limite máximo igual ao número de divisões da habitação (quartos e sala), sendo este equivalente ao número,  $n$ , convencional de pessoas por alojamento – que, no caso da habitação de referência para a aplicação do modelo, é igual a 3. Pressupôs-se, ainda, que apenas poderá existir uma lareira com recuperador de calor cujo valor de energia útil está limitado a um valor anual determinado *a priori* – equivalente ao produto entre o valor médio de lenha consumido por este tipo de equipamentos e a eficiência estimada.

**Tabela 5.6** - Parâmetros relativos aos mecanismos de preparação de AQS.

VD	Aparelho	Eficiência	Proporção de consumo de:			Custo de investimento
			Eletricidade	Gás natural	Pellets	
$x(1)$	$x_1^A$ Caldeira a gás natural	77%	0,49%	99,51%	-	798,21€
$x(2)$	$x_2^A$ Caldeira a biomassa	90%	0,60%	-	99,40%	3.788,40€
$x(3)$	$x_3^A$ Bomba de calor	114%	100%	-	-	2.152,50€
$x(4)$	$x_4^A$ Esquentador elétrico	38%	100%	-	-	227,55€
$x(5)$	$x_5^A$ Termoacumulador	39%	100%	-	-	276,02€
		Energia útil produzida			Custo de investimento	
$x(6)$	$x_6^A$ Painel solar térmico: sistema de circulação forçada	243 kWh/m <sup>2</sup>			1.713,99€/m <sup>2</sup>	
$x(7)$	$x_7^A$ Painel solar térmico: sistema termossifão	217 kWh/m <sup>2</sup>			332,07€/m <sup>2</sup>	

**Tabela 5.7** - Parâmetros relativos aos mecanismos de aquecimento de espaço.

VD	Aparelho	Eficiência	Proporção de consumo de:		Custo de investimento
			Eletricidade	Gás natural	
$x(1)$	$x_1^E$ Caldeira a gás natural	75%	0,49%	99,51%	798,21€
$x(8)$	$x_2^E$ Ar condicionado	3,8 <sup>1</sup>	100%	-	3.788,40€
		Eficiência	Consumo médio de eletricidade		Custo de investimento
$x(9)$	$x_3^E$ Aquecedor a óleo	100%	3.340 kWh/ano		69,99€
		Eficiência	Consumo médio de lenha		Custo de investimento
$x(10)$	$x_4^E$ Lareira com recuperador de calor	75%	15.497,6 kWh/ano <sup>2</sup>		1.290,00€

Finalmente, a Tabela 5.8 remete para os parâmetros do ar condicionado quando aplicado para arrefecimento de espaço – já que este aparelho constitui a única opção considerada no modelo para satisfazer as necessidades desse âmbito.

**Tabela 5.8** - Parâmetros relativos ao mecanismo de arrefecimento de espaço.

VD	Aparelho	Eficiência	Proporção de consumo de:	Custo de investimento
			Eletricidade	
$x(8)$	$u_1$ Ar condicionado	5,1 <sup>3</sup>	100%	3.788,40€

<sup>1</sup> Valor de SCOP - Coeficiente de desempenho sazonal no aquecimento

<sup>2</sup> Equivalente a 3.874,4 kg de lenha/ano

<sup>3</sup> Valor de SEER - Valor da relação de eficiência energética sazonal no arrefecimento

### 5.2.3 Parâmetros característicos dos materiais das janelas

No que concerne aos parâmetros característicos dos materiais das janelas, os mesmos foram obtidos de Monteiro *et al.* (2016) e são descritos nas Tabelas 5.9 e 5.10.

**Tabela 5.9** - Parâmetros relativos aos materiais das janelas.

VD		Material das janelas	$U_{jj}$ $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$	Custo de investimento (€/m <sup>2</sup> )
x(11)	y <sub>1</sub>	Metal (sem TB), Vidros Duplos Ar (4mm + 6mm + 4mm)	4,02	99,29
x(12)	y <sub>2</sub>	Metal (sem TB), Vidros Duplos Árgon (4mm+10mm+4mm)	3,67	106,05
x(13)	y <sub>3</sub>	Metal (sem TB), Vidros Duplos Ar (6mm+6mm+6mm)	3,95	121,64
x(14)	y <sub>4</sub>	Metal (sem TB), Vidros Duplos Árgon (6mm+10mm+6mm)	3,60	128,28
x(15)	y <sub>5</sub>	Metal (sem TB), Vidros Duplos Ar com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)	3,46	169,45
x(16)	y <sub>6</sub>	Metal (sem TB), Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)	2,69	176,09
x(17)	y <sub>7</sub>	Metal (sem TB), Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (6mm+12mm+6mm)	2,62	181,41
x(18)	y <sub>8</sub>	Metal (TB), Vidros Duplos Ar (4mm + 6mm + 4mm)	3,06	273,59
x(19)	y <sub>9</sub>	Metal (TB), Vidros Duplos Árgon (4mm+10mm+4mm)	2,71	280,35
x(20)	y <sub>10</sub>	Metal (TB), Vidros Duplos Ar (6mm+6mm+6mm)	2,99	295,94
x(21)	y <sub>11</sub>	Metal (TB), Vidros Duplos Árgon (6mm+10mm+6mm)	2,64	302,58
x(22)	y <sub>12</sub>	Metal (TB), Vidros Duplos Ar com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)	2,50	343,75
x(23)	y <sub>13</sub>	Metal (TB), Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)	1,73	350,39
x(24)	y <sub>14</sub>	Metal (TB), Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (6mm+12mm+6mm)	1,66	355,71
x(25)	y <sub>15</sub>	PVC, Vidros Duplos Ar (4mm+6mm+4mm)	2,88	212,64
x(26)	y <sub>16</sub>	PVC, Vidros Duplos Árgon (4mm+10mm+4mm)	2,56	219,40
x(27)	y <sub>17</sub>	PVC, Vidros Duplos Ar (6mm+6mm+6mm)	2,82	234,99
x(28)	y <sub>18</sub>	PVC, Vidros Duplos Árgon (6mm+10mm+6mm)	2,49	241,63
x(29)	y <sub>19</sub>	PVC, Vidros Duplos Árgon (8mm+12mm+8mm)	2,43	261,81

**Tabela 5.10** - Parâmetros relativos aos materiais das janelas (continuação).

VD	Material das janelas		$U_{j,j}$ $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$	Custo de investimento (€/m <sup>2</sup> )
x(30)	y <sub>20</sub>	PVC, Vidros Duplos Ar com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)	2,36	282,80
x(31)	y <sub>21</sub>	PVC, Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)	1,65	289,44
x(32)	y <sub>22</sub>	PVC, Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (6mm+12mm+6mm)	1,58	294,76
x(33)	y <sub>23</sub>	Janela Original	3,9967	0,00

#### 5.2.4 Parâmetros característicos dos mecanismos de sombreamento

À semelhança da subsecção anterior, os parâmetros relativos às opções para o sombreamento foram retirados de Monteiro *et al.* (2016) e encontram-se na Tabela 5.11.

**Tabela 5.11** - Parâmetros relativos aos mecanismos de sombreamento.

VD	Mecanismo de sombreamento		$F_oF_f_j$	Custo de investimento (€/m <sup>2</sup> )
x(34)	v <sub>1</sub>	Madeira - horizontal e fixo - 45°	0,69	175,00
x(35)	v <sub>2</sub>	Madeira - horizontal e móvel - 45°	0,69	205,00
x(36)	v <sub>3</sub>	Metal - <i>overhang</i> e fixo - 45°	0,69	104,00
x(37)	v <sub>4</sub>	Metal - horizontal e fixo - 45°	0,69	99,00
x(38)	v <sub>5</sub>	Metal - horizontal e móvel (120 mm) - 30°	0,80	274,00
x(39)	v <sub>6</sub>	Metal - horizontal e móvel (145mm) - 45°	0,69	288,20
x(40)	v <sub>7</sub>	Metal - horizontal e móvel (190mm) - 60°	0,60	306,28
x(41)	v <sub>8</sub>	Metal - horizontal e móvel (250mm) - 30°	0,80	313,04
x(42)	v <sub>9</sub>	Metal - horizontal e móvel (300mm) - 45°	0,69	321,45
x(43)	v <sub>10</sub>	Metal - horizontal e móvel (400mm) - 60°	0,60	334,28
x(44)	v <sub>11</sub>	Metal - vertical e fixo - 45°	0,86	127,79
x(45)	v <sub>12</sub>	PVC - horizontal e fixo - 30°	0,80	30,04
x(46)	v <sub>13</sub>	PVC - horizontal e móvel - 45°	0,69	45,40
x(47)	v <sub>14</sub>	Sem mecanismo de sombreamento	0,90	0,00

## 5.2.5 Parâmetros característicos dos materiais de isolamento

Também os parâmetros que caracterizam cada uma das opções para o material de isolamento foram recolhidos de Monteiro *et al.* (2016) e são apresentados na Tabela 5.12.

**Tabela 5.12** - Parâmetros relativos aos materiais de isolamento.

VD		Material de isolamento	$U_{pj}$ ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ )	Custo de investimento ( $\text{€}/m^2$ )
x(48)	$w_1$	Poliestireno expandido (EPS) 0,03m	0,77	5,28
x(49)	$w_2$	Poliestireno expandido (EPS) 0,04m	0,63	7,02
x(50)	$w_3$	Poliestireno expandido (EPS) 0,05m	0,53	8,78
x(51)	$w_4$	Poliestireno expandido (EPS) 0,06m	0,46	10,54
x(52)	$w_5$	Poliestireno expandido (EPS) 0,08m	0,36	14,06
x(53)	$w_6$	Poliestireno expandido (EPS) 0,1m	0,30	17,58
x(54)	$w_7$	Poliestireno extrudido (XPS) 0,03m	0,82	11,93
x(55)	$w_8$	Poliestireno extrudido (XPS) 0,04m	0,67	15,90
x(56)	$w_9$	Poliestireno extrudido (XPS) 0,05m	0,57	19,88
x(57)	$w_{10}$	Poliestireno extrudido (XPS) 0,06m	0,49	23,85
x(58)	$w_{11}$	Lã de rocha 0,03m	0,80	7,00
x(59)	$s_{12}$	Lã de rocha 0,04m	0,66	9,15
x(60)	$w_{13}$	Lã de rocha 0,05m	0,55	11,64
x(61)	$w_{14}$	Lã de rocha 0,06m	0,48	13,97
x(62)	$w_{15}$	Lã de rocha 0,08m	0,38	18,62
x(63)	$w_{16}$	Lã de rocha 0,1m	0,31	23,28
x(64)	$w_{17}$	Painel de cortiça expandida 0,03m	0,86	9,51
x(65)	$w_{18}$	Painel de cortiça expandida 0,04m	0,71	12,30
x(66)	$w_{19}$	Painel de cortiça expandida 0,05m	0,6	15,38
x(67)	$w_{20}$	Painel de cortiça expandida 0,06m	0,52	18,45
x(68)	$w_{21}$	Painel de cortiça expandida 0,08m	0,41	24,60
x(69)	$w_{22}$	Painel de cortiça expandida 0,1m	0,34	30,75
x(70)	$w_{23}$	Material de isolamento original	1,7272	0,00

## 5.2.6 Parâmetros característicos do mecanismo de produção de energia

Por fim, foram estabelecidos os parâmetros do mecanismo de produção de energia - Tabela 5.13 . Estes valores foram obtidos de Eilhauer (2015), correspondendo o valor de energia útil produzida aos valores expectáveis para um aparelho instalado na zona de Lisboa.

**Tabela 5.13** - Parâmetros relativos ao mecanismo de produção de energia.

VD	Mecanismo de produção de energia	Energia útil produzida	Custo de investimento
$x(71)$	$p_1$ Painel solar fotovoltaico	227 kWh/m <sup>2</sup>	250,00€/m <sup>2</sup>

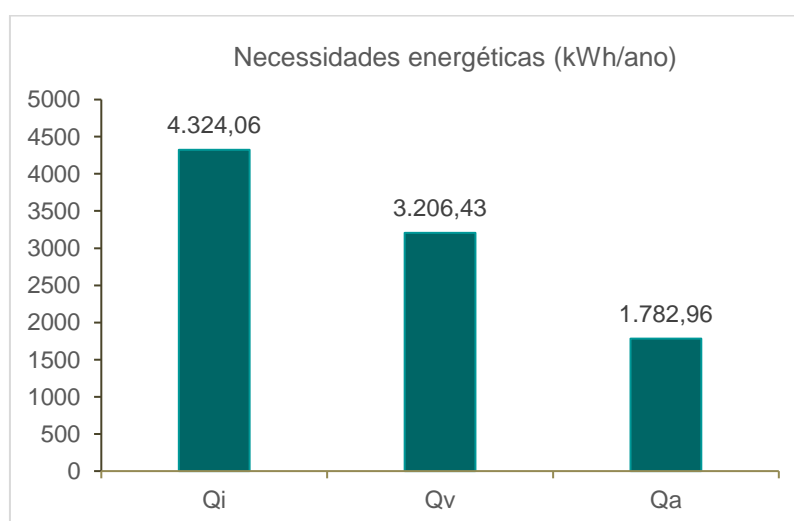
## 5.3 Necessidades energéticas da habitação de referência

A partir das fórmulas estipuladas na legislação e descritas no modelo, procedeu-se ao cálculo das necessidades energéticas anuais da habitação de referência (considerando o material das janelas e do isolamento originais e que não existe mecanismo de sombreamento). Deste cálculo resultaram os valores demonstrados pelo gráfico representado na Figura 5.1.

Assim, a habitação de referência apresenta uma necessidade energética de aquecimento de espaço ( $Q_i$ ) equivalente a 4.324,06 kWh/ano, sendo esta a componente que requer um valor maior de energia útil para que seja satisfeita.

Por sua vez, a energia útil necessária ao arrefecimento de espaço ( $Q_v$ ) é de 3.206,43 kWh/ano – valor que já se esperava ser inferior ao das necessidades de aquecimento devido à menor duração da estação de arrefecimento relativamente à de aquecimento.

Finalmente, as necessidades de energia útil para preparação de AQS ( $Q_a$ ) da habitação de referência são de 1.782,96 kWh/ano. No entanto, é de realçar que este valor, ao contrário dos anteriores, não depende das variáveis de decisão incluídas no modelo, pelo que se manterá inalterado com a sua execução.



**Figura 5.1** - Gráfico representativo das necessidades energéticas anuais para a habitação de referência.

Ainda, para posterior análise dos resultados apresentados pelo modelo e comparação com os valores limites definidos pela legislação atual, é relevante destacar os valores das necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento de espaço ( $N_i$  e  $N_v$ ) da habitação de referência. Por conseguinte, as necessidades nominais de aquecimento de espaço são de  $44,06 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$  e as necessidades nominais de arrefecimento de espaço são de  $32,67 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$ .

## 5.4 Aplicação do modelo de otimização

Para a aplicação do modelo, recorreu-se ao *software* MATLAB dado que este é de fácil utilização. Além disso, outra das suas mais-valias reside no facto deste *software* ser usado por uma vasta comunidade que contribui para o seu desenvolvimento através da partilha de conhecimento. Deste modo, existem à disposição na internet um considerável leque de tutoriais, exemplos e respostas a dúvidas para as aplicações e ferramentas do MATLAB.

Assim, cada uma das funções-objetivo descritas no Capítulo 4 foi programada recorrendo a esse *software*. Além das funções-objetivo, foi também criada uma função adicional cujo objetivo consiste na leitura dos dados do modelo, previamente inseridos num ficheiro Excel.

Depois de desenvolvidas as funções que definem o modelo, é necessário seleccionar o método pretendido para a execução do modelo de otimização. Para isso, o MATLAB dispõe de uma ferramenta de otimização (“Optimization toolbox”) onde foi escolhido o algoritmo genético como método de resolução – uma vez que este revelou ser o método mais comum para a resolução deste tipo de modelos.

### 5.4.1 Algoritmo genético

Como referido no capítulo da revisão bibliográfica, na resolução deste tipo de problemas aplicam-se, usualmente, metaheurísticas. Neste modelo, em específico, recorreu-se ao algoritmo genético, correspondendo cada indivíduo a uma possível solução do problema. Desta forma, cada indivíduo é caracterizado pelo seu genoma - o conjunto de setenta e um cromossomas (o equivalente ao número de variáveis de decisão do modelo) - conforme representado pela Figura 5.2.

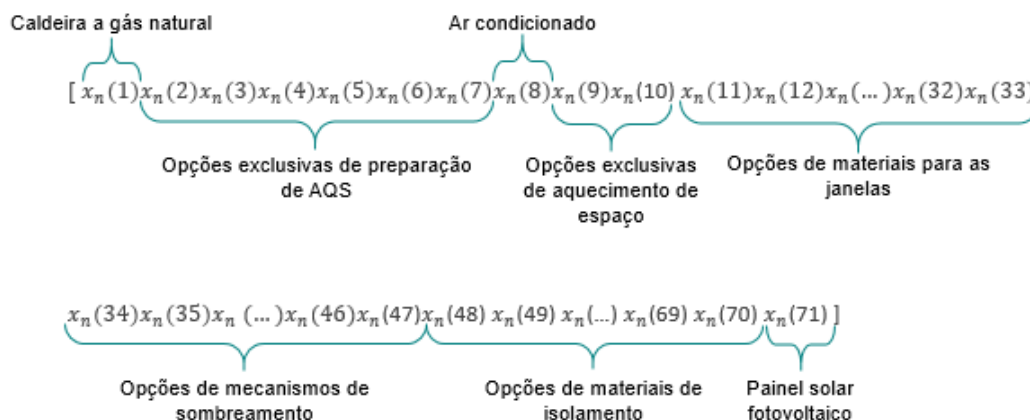
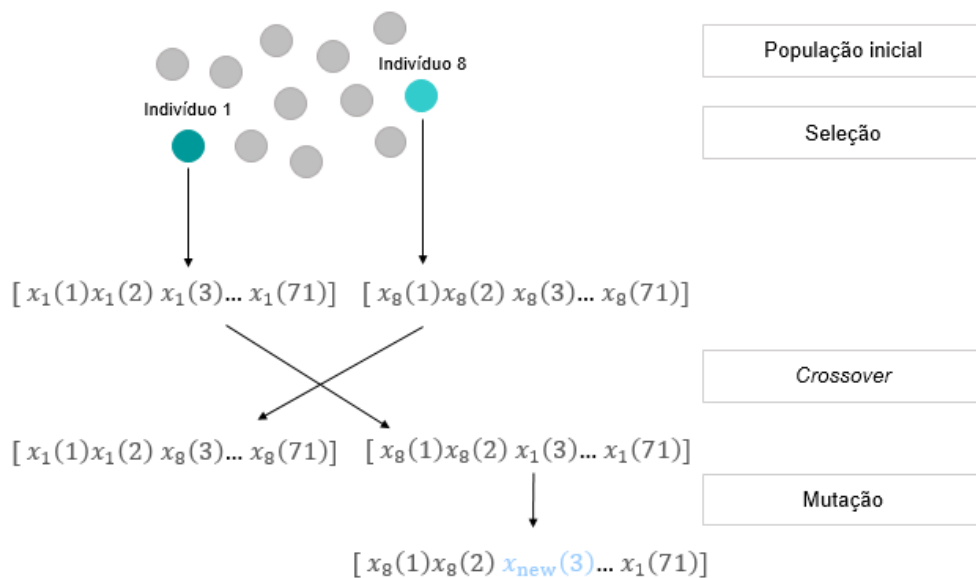


Figura 5.2 - Representação do genoma do indivíduo  $n$  - adaptado de Eilhauer, 2015.

O processo que ocorre durante a execução do algoritmo genético encontra-se esquematizado na Figura 5.3. Assim, a partir da população inicial, são selecionados aleatoriamente pares de indivíduos para que sejam cruzados, isto é, para que haja uma troca de genoma arbitrária entre eles e se gerem dois novos indivíduos – *crossover*. Tendo ocorrido este processo, pode acontecer uma mutação - procedimento aleatório que altera valor de um cromossoma.

Ao longo destes procedimentos, o algoritmo verifica se os cromossomas estão dentro dos limites definidos e se cumprem as restrições. Ainda, a cada iteração, cada indivíduo vai sendo avaliado segundo a sua adaptação ao problema (neste caso, segundo o seu valor para as funções-objetivo).



**Figura 5.3** - Esquematização dos procedimentos que ocorrem aquando da execução do algoritmo genético – adaptado de Eilhauer, 2015.

Apesar do modelo ser multiobjetivo, dadas as limitações da função “gamultiobj()” do MATLAB (que, entre outras limitações, não permite a definição de variáveis de decisão como inteiras), foi necessário transformar o modelo para uma só função-objetivo, de forma a ser possível correr com recurso à função “ga()”. Assim, a junção das duas funções-objetivo resultou na função representada pela expressão (5-1), onde cada  $\lambda$  representa um coeficiente pelo qual cada função é valorizada.

$$f = \min(\lambda_1 \cdot f_1(x) + \lambda_2 \cdot f_2(x)) \quad (5-1)$$

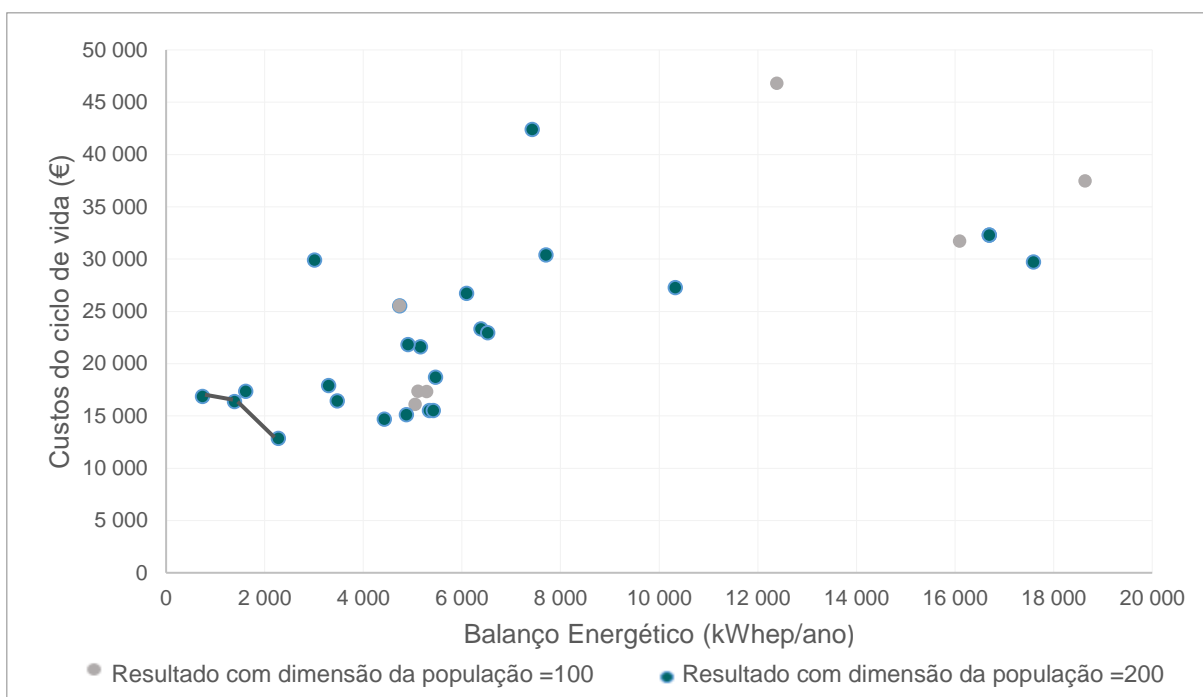
Consequentemente, o valor dos coeficientes ia sendo alterado para tornar possível a construção da Curva de Pareto, (por exemplo, inicialmente  $\lambda_1 = 0,1$  e  $\lambda_2 = 0,9$ , variando estes valores em 0,1 por forma a que a soma dos dois coeficientes fosse sempre igual a um). Por sua vez, para que se alcançassem diferentes soluções, o modelo foi executado várias vezes para um mesmo conjunto de coeficientes. O código utilizado para a execução do modelo encontra-se no Anexo C – aqui “onepatricia” equivale à função  $f$  apresentada em (5-1).

É também nesta fase que são declaradas as variáveis como inteiras e são definidas as restrições do modelo e os limites para cada variável de decisão. Além disso, definem-se as opções em que o

modelo irá ser executado. Assim, foi definido o número de gerações, igual a 10.000, a fração de crossover, igual a 0,7, e a dimensão da população, igual a 100 indivíduos.

## 5.5 Análise de resultados

Após a execução do modelo para diferentes valores de coeficientes, foram obtidas as soluções apresentadas no gráfico da Figura 5.4. Neste gráfico, existem pontos assinalados com cores diferentes procurando representar soluções devolvidas para diferentes dimensões da população (100 ou 200 indivíduos). Desta forma, a experiência da execução do modelo permitiu concluir que quanto maior a dimensão da população maior o tempo consumido. No entanto, é também maior o número de soluções encontradas, apesar de se manter uma dispersão dos pontos.



**Figura 5.4** - Conjunto de soluções encontradas com a execução do modelo.

Ainda, importa realçar que o algoritmo genético é uma metaheurística e, como tal, os seus resultados podem não devolver as soluções ótimas para o modelo em análise. Apenas é garantido que em cada execução do modelo é devolvida a melhor solução do conjunto que constitui a população no momento em que foram atingidos os critérios de paragem que determinam o final da corrida. Assim, dos pontos assinalados no gráfico, os três no canto inferior esquerdo (identificados pelos traços a cinzento) delimitam a Curva de Pareto, isto é, constituem o conjunto de soluções não-dominado na minimização das duas funções-objetivo. Porém, como referido, estes pontos podem não pertencer à real frente de Pareto delimitada pelas soluções ótimas do modelo.

### 5.5.1 Análise das soluções não-dominadas

Das soluções geradas com a execução do modelo, interessa analisar com maior detalhe as soluções não-dominadas – os três pontos no canto inferior esquerdo que apresentam os valores mínimos obtidos para as duas funções-objetivo. Estas soluções caracterizam-se pelos valores das Tabelas 5.14 e 5.15.

**Tabela 5.14** - Caracterização das soluções não-dominadas.

Ponto	Balanco Energético ( $kWh_{ep}/ano$ )	LCC (€)	Mecanismo de aquecimento de águas sanitárias	Mecanismo de aquecimento de espaço	Mecanismo de arrefecimento de espaço	Material das janelas	Mecanismo de sombreamento	Material de isolamento térmico	Dimensão do painel solar fotovoltaico
1	741,01	16.874	Caldeira a gás natural e painel solar térmico: sistema de termossifão ( $4 m^2$ )	Caldeira a gás natural	-	Metal (TB), Vidros duplos, árgon (6mm+10mm+6mm)	Metal - vertical e fixo - $45^\circ$	Painel de cortiça expandida 0,1m	$12 m^2$
2	1.390,50	16.374	Caldeira a biomassa e painel solar térmico: sistema de termossifão ( $3 m^2$ )	Ar condicionado	Ar condicionado	Metal (TB), Vidros duplos, ar (6mm+6mm+6mm)	PVC – fixo e horizontal $30^\circ$	Poliestireno Expandido (EPS) 0,03m	$13 m^2$
3	2.277,20	12.855	Bomba de calor e painel solar térmico: sistema de termossifão ( $4 m^2$ )	Ar condicionado	Ar condicionado	Metal (sem TB), Vidros duplos, árgon (6mm+10mm+6mm)	Sem mecanismo	Poliestireno Expandido (EPS) 0,08m	$12 m^2$

**Tabela 5.15** - Continuação da caracterização das soluções não-dominadas.

Ponto	Balanco Energético ( $kWh_{ep}/(ano. m^2)$ )	LCC (€/m <sup>2</sup> )	$\frac{N_i}{(m^2. ano)}$		$\frac{N_v}{(m^2. ano)}$		$\frac{U_j}{(m^2. ^\circ C)}$		$\frac{U_p}{(m^2. ^\circ C)}$		$F_o. F_f$	%REN <sup>4</sup>
1	7,6	172,01	17,21	-61% <sup>4</sup>	34,00	+4% <sup>5</sup>	2,64	-34% <sup>6</sup>	0,34	-80% <sup>7</sup>	0,86	78,6%
2	14,2	166,91	25,64	-42% <sup>4</sup>	30,40	-7% <sup>5</sup>	2,99	-25% <sup>6</sup>	0,77	-55% <sup>7</sup>	0,8	68,0%
3	23,2	131,04	20,97	-52% <sup>5</sup>	34,11	+4% <sup>6</sup>	3,6	-10% <sup>7</sup>	0,36	-79% <sup>8</sup>	0,9	54,5%

<sup>4</sup> Este valor tem apenas em consideração a energia produzida pelo painel solar fotovoltaico face à energia primária consumida pelos vários aparelhos.

<sup>5</sup> Em comparação com o valor de necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do espaço da habitação de referência.

<sup>6</sup> Em comparação com o valor de necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento do espaço da habitação de referência.

<sup>7</sup> Em comparação com o valor do coeficiente de transmissão térmica das janelas da habitação de referência.

<sup>8</sup> Em comparação com o valor do coeficiente de transmissão térmica das paredes exteriores da habitação de referência.

Em primeiro lugar, antes de analisar os resultados apresentados, salienta-se que para a execução do modelo foram consideradas todas as restrições referidas na Subsecção 4.1.2 com exceção da obrigatoriedade de satisfação das necessidades de arrefecimento de espaço. Esta restrição não foi imposta ao modelo já que implicaria que o ar condicionado fosse escolhido – pois é a única opção de mecanismo de arrefecimento do ambiente e participa também como opção para o aquecimento. Desta forma, sem imposição desta restrição, o modelo teve liberdade para optar por outro mecanismo de aquecimento de espaço que não o ar condicionado.

Comparando numa análise inicial os três pontos da frente de Pareto, é possível perceber que a solução apresentada pelo “Ponto 1” (ponto mais à esquerda no gráfico) consegue atingir um valor tão baixo de balanço energético porque poupa no consumo de energia para arrefecimento do espaço. Como tal, olhar para o resultado deste balanço energético pode induzir em erro, provocando conclusões precipitadas.

Por outro lado, quando avaliada a solução introduzida pelo “Ponto 3” (ponto mais à direita no gráfico), é de notar que um motivo para os custos serem inferiores centra-se no facto desta solução não requerer um mecanismo de sombreamento.

Analisando com maior detalhe as soluções obtidas, esperava-se que os aparelhos elétricos não fossem preferidos face às outras opções já que a eletricidade impacta negativamente nas duas funções-objetivo – por um lado, 1 *kWh* de eletricidade consumida equivale a 2,5 *kWh* de energia primária consumida (2,5 *kWh<sub>ep</sub>*) e, por outro, o preço considerado para cada *kWh* de eletricidade é o maior dos preços dos vários vetores energéticos. No entanto, as soluções na frente de Pareto incluem a opção do ar condicionado pois existe um painel solar fotovoltaico a produzir a eletricidade necessária - diminuindo os custos de operação associados ao consumo de eletricidade. Adicionalmente, a utilização deste aparelho é também preferida devido à sua elevada eficiência, comparativamente com a de outras opções.

No que concerne às necessidades energéticas de aquecimento de espaço, ambas as soluções apresentam uma redução considerável face à habitação de referência. Tal é justificado pelo investimento na renovação das janelas e do isolamento térmico das paredes exteriores. Além disso, para avaliar estes resultados, foi determinado o valor máximo para as necessidades nominais de energia útil para aquecimento do espaço para a habitação usada como referência – conforme proposto pela Portaria N.º 349-B/2013 – sendo este equivalente a 25,38 *kWh/(m<sup>2</sup>.ano)*. A partir deste dado é possível concluir que tanto as soluções apresentadas pelo “Ponto 1” como pelo “Ponto 3”, cumprem com os requisitos da legislação para um edifício construído de raiz a partir de 31 de dezembro de 2015. Contudo, o mesmo não acontece para as necessidades energéticas de arrefecimento do espaço já que o valor máximo previsto na legislação e calculado segundo a localização da habitação de referência, é de apenas 20,74 *kWh/(m<sup>2</sup>.ano)* e nenhum dos pontos se aproxima desse valor.

Para reduzir o valor das necessidades energéticas de arrefecimento, é necessário investir em soluções que aumentem o sombreamento (ou seja, que tenham um valor  $F_o.F_f$  baixo). Todavia, com a restrição imposta pela legislação (a da expressão (4-39) referida na Subsecção 4.1.2), os valores de

$F_o, F_f$  são no máximo de 0,70. Deste modo, as opções que diminuem fortemente as necessidades energéticas de arrefecimento, não podem ser selecionadas pelo modelo.

Em contrapartida, investir no aumento do sombreamento, aumenta as necessidades térmicas de aquecimento. Por isso, é necessário avaliar com cuidado ambos os tipos de necessidades energéticas, já que as transformações na estrutura física da casa que beneficiam um, prejudicam o outro. Por exemplo, investir em soluções para paredes e janelas cujo coeficiente de transmissão térmica seja baixo é útil na estação de aquecimento, mas tem o comportamento oposto na estação de arrefecimento (apesar de o impacto destas características ser bastante inferior ao do sombreamento no que diz respeito às necessidades energéticas de arrefecimento).

Outra análise que interessa realizar aos valores sugeridos pelas soluções não-dominadas, é ao balanço energético de energia primária por unidade de área. Este valor pode ser lido na Tabela 5.15 e varia entre os  $7,6 \text{ kWhep}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$  - valor atingido pelo ponto mais à esquerda, que despreza a satisfação das necessidades de arrefecimento - e os  $23,2 \text{ kWhep}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$ . Quando confrontados estes valores com os já definidos pelos Estados-Membros e expostos na Tabela 2.1, é possível perceber que o único país em que a meta para edifícios residenciais é tão exigente (igual a  $20 \text{ kWhep}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$ ) é a Dinamarca.

Por fim, é relevante analisar o valor da percentagem de renováveis, dado pelo rácio entre a energia produzida pelo painel solar fotovoltaico e o consumo de energia primária. Este varia, no conjunto das três soluções não-dominadas, entre os 54,5% e os 78,6%. Mais uma vez, é de salientar que olhar com entusiasmo para o maior valor de percentagem de renováveis pode ser precipitado já que, neste caso, o valor de consumo de energia é bastante reduzido dado que foram ignoradas as necessidades de arrefecimento. No entanto, importa destacar que mesmo a opção que mais minimiza os custos tem uma quota-parte de mais de 50% de renováveis (medida em relação à energia primária consumida). Assim, a avaliação destes valores é relevante para a definição da quota-parte de renováveis que Portugal deve impor – aqui, é de realçar a importância do investimento em painéis solares já que o aproveitamento da energia solar tem um grande impacto na diminuição do balanço energético.

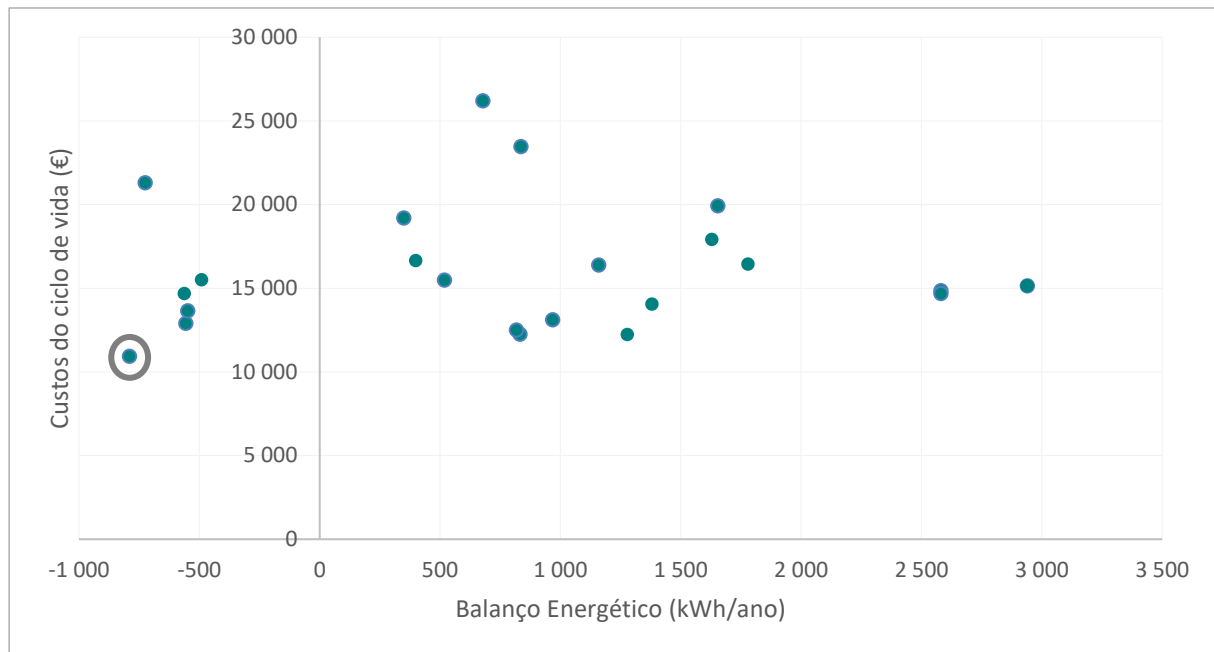
## 5.6 Análise de sensibilidade

Da análise de resultados, tornou-se relevante perceber como é que os mesmos seriam afetados com a avaliação do balanço energético em termos de energia final em vez de energia primária; quando se impõe a satisfação das necessidades de arrefecimento; ou, ainda, quando é requerido o cumprimento do limite para as necessidades nominais anuais de energia útil, conforme definido pela legislação. Deste modo, procedeu-se a uma análise de sensibilidade que implicou alterações na estrutura do modelo em vez de alterações nos seus parâmetros - como é tradicional das análises de sensibilidades.

### 5.6.1 Balanço energético avaliado em energia final

Para a avaliação do balanço energético em energia final, foram excluídas, do modelo anteriormente formulado, as equações de conversão da energia final em energia primária. Assim, a Figura 5.5 revela o gráfico com os resultados obtidos da aplicação do modelo reformulado. Destes resultados, apenas

uma solução é não-dominada (solução rodeada a cinzento). As características desta solução estão expostas nas Tabelas 5.16 e 5.17.



**Figura 5.5** - Conjunto de soluções encontradas com a execução do modelo quando o balanço energético é avaliado em termos de energia final.

Como é possível perceber a partir do gráfico da Figura 5.5, quando o balanço energético é calculado em termos de energia final, é possível obter balanços energéticos negativos. Isto significa que o valor de energia produzida supera o de energia consumida. No entanto, salienta-se que, apesar de existir um excedente de energia produzida, tal não significa que a habitação em análise necessita apenas da energia produzida pelo painel solar fotovoltaico – em primeiro lugar porque podem existir aparelhos que não sejam elétricos e, em segundo lugar, porque os picos de consumo podem não coincidir com os picos de produção da eletricidade pelo painel (requerendo eletricidade vinda da rede).

Ainda, com base nos valores obtidos para o balanço energético, pode acontecer que o painel solar fotovoltaico esteja sobredimensionado já que um dos objetivos do modelo é o da minimização do balanço (ou seja, do ponto de vista do modelo de otimização, quanto mais negativo for o balanço energético, melhor). Desta forma, o valor dos custos do ciclo de vida pode na realidade ser inferior ao atingido pela solução não-dominada e o do verdadeiro balanço energético pode ser superior (no caso do referido sobredimensionamento do painel solar fotovoltaico).

Com base na análise das características da única solução não-dominada, nota-se que, mesmo sem a restrição que obriga à satisfação das necessidades energéticas de arrefecimento, o modelo selecionou o aparelho de ar condicionado. Este resultado vem demonstrar que compensa investir no ar condicionado e na bomba de calor dada as suas elevadas eficiências na transformação de eletricidade consumida em energia útil. Assim, é possível uma poupança na parcela dos custos de operação. Ainda, é de realçar que a seleção das opções de aparelhos elétricos é favorecida quando o balanço é avaliado em energia final face ao balanço em energia primária.

**Tabela 5.16** - Caracterização da solução não-dominada devolvida pela execução do modelo quando o balanço energético é avaliado em termos de energia final.

Balanço Energético (kWh/ano)	LCC (€)	Mecanismo de aquecimento de águas sanitárias	Mecanismo de aquecimento de espaço	Mecanismo de arrefecimento de espaço	Material das janelas	Mecanismo de sombreamento	Material de isolamento térmico	Dimensão do painel solar fotovoltaico
-789,54	10.941	Bomba de calor e painel solar térmico: sistema de termossifão (3 m <sup>2</sup> )	Ar condicionado	Ar condicionado	Original	PVC- horizontal e fixo - 30°	Lã de Rocha 0,1m	13 m <sup>2</sup>

**Tabela 5.17** - Continuação da caracterização da solução não-dominada devolvida pela execução do modelo quando o balanço energético é avaliado em termos de energia final.

Balanço Energético (kWh/(ano. m <sup>2</sup> ))	LCC (€/m <sup>2</sup> )	$\frac{N_i}{(m^2 \cdot ano)}$ (kWh)		$\frac{N_v}{(m^2 \cdot ano)}$ (kWh)		$\frac{U_j}{(m^2 \cdot ^\circ C)}$ (W)		$\frac{U_p}{(m^2 \cdot ^\circ C)}$ (W)		$F_o \cdot F_f$	%Painel Solar Fotovoltaico <sup>9</sup>	%REN <sup>10</sup>
-8,05	111,53	23,28	-47% <sup>11</sup>	29,48	-9,8% <sup>12</sup>	3,9967	0% <sup>13</sup>	0,31	-82% <sup>14</sup>	0,8	137%	128%

<sup>9</sup> Valor de energia produzida pelo painel solar fotovoltaico face ao valor da energia consumida (quando é considerado que o painel solar térmico contribui para a redução do consumo de energia - este cálculo é equivalente ao do da "%REN" da Tabela 5.15 mas aqui em termos de energia final).

<sup>10</sup> Valor de energia produzida por painéis solares térmico e fotovoltaico face ao valor de energia total consumida.

<sup>11</sup> Em comparação com o valor de necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do espaço da habitação de referência.

<sup>12</sup> Em comparação com o valor de necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento do espaço da habitação de referência.

<sup>13</sup> Em comparação com o valor do coeficiente de transmissão térmica das janelas da habitação de referência.

<sup>14</sup> Em comparação com o valor do coeficiente de transmissão térmica das paredes exteriores da habitação de referência.

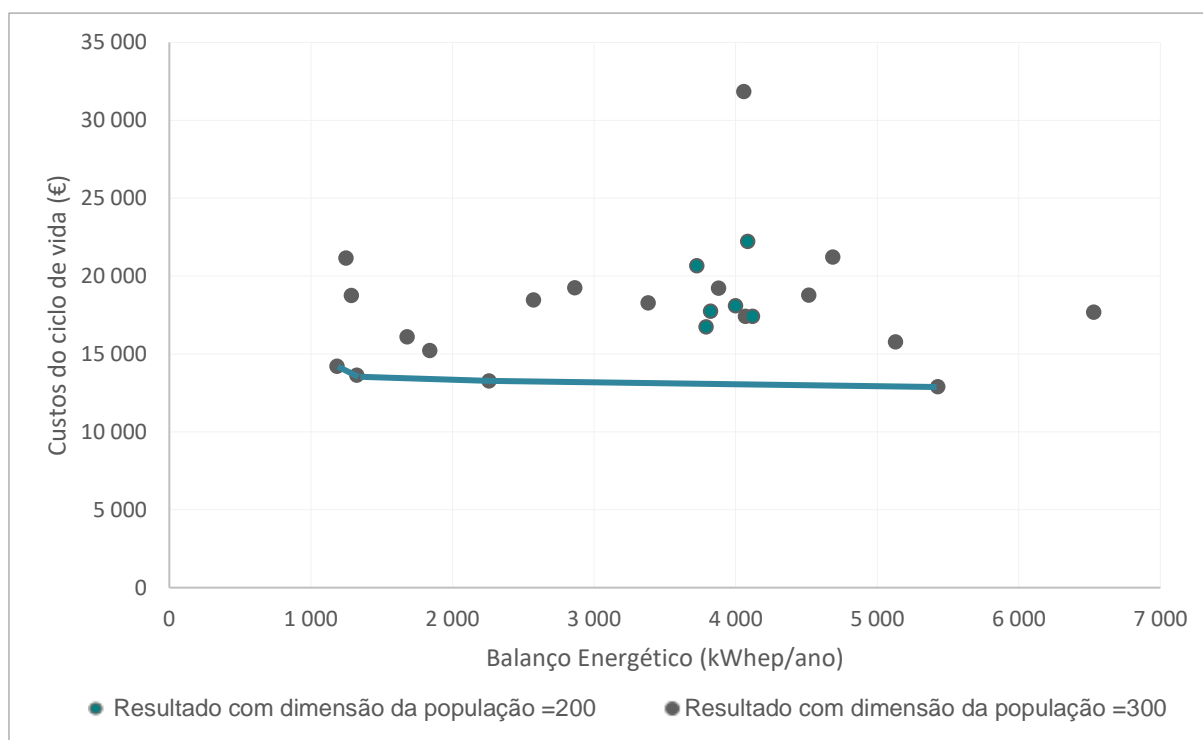
Adicionalmente, é curioso perceber que apesar do material das janelas ter sido mantido o original da habitação de referência, conseguiu-se alcançar uma redução considerável no valor de necessidades energéticas de aquecimento já que o material de isolamento térmico foi substituído por um dos materiais com menor valor de coeficiente de transmissão térmica. Esta escolha é justificada pelo facto do custo de investimento no material de isolamento térmico ser substancialmente inferior ao do investimento no material das janelas.

Finalmente, da análise destes resultados é possível concluir que se a EPBD reformulada exigisse a avaliação do balanço energético em termos de energia final, mais facilmente se alcançaria a meta de edifícios de balanço energético nulo. Ainda, estes resultados vêm reforçar a pertinência da colocação de painéis solares fotovoltaicos nos edifícios residenciais para seu autoconsumo.

### 5.6.2 Satisfação das necessidades energéticas de arrefecimento do espaço

Na presente análise, o modelo inicial foi alterado para fosse garantida a satisfação das necessidades de arrefecimento sempre que as necessidades energéticas nominais anuais para o arrefecimento do espaço fossem superiores a  $20,74 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$  – o valor máximo previsto na legislação, a partir de 31 de dezembro de 2015, para um edifício novo com a mesma localização que o edifício de referência utilizado para a aplicação do modelo.

Com a reformulação do modelo, os resultados alcançados são os presentes no gráfico da Figura 5.6. Importa notar que o aumento da complexidade do modelo, com a adição desta restrição, tornou mais difícil a obtenção de resultados melhores. De tal modo que foi necessário aumentar a dimensão da população para 300 indivíduos para obter resultados mais próximos dos valores conseguidos em 5.5.1 pelas opções que também satisfaziam as necessidades de arrefecimento.



**Figura 5.6** - Resultados obtidos da execução do modelo com a obrigatoriedade da satisfação das necessidades energéticas de arrefecimento de espaço.

**Tabela 5.18** - Caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando é requerida a satisfação das necessidades de arrefecimento.

Ponto	Balço Energético ( $kWh_{ep}/ano$ )	LCC (€)	Mecanismo de aquecimento de águas sanitárias	Material das janelas	Mecanismo de sombreamento	Material de isolamento térmico	Dimensão do painel solar fotovoltaico
1	1.186,00	14.203	Caldeira a biomassa e painel solar térmico: sistema de termossifão (4 $m^2$ )	Metal (sem TB), Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)	Sem mecanismo	Lã de Rocha 0,06m	12 $m^2$
2	1.324,40	13.633	Caldeira a biomassa e painel solar térmico: sistema de termossifão (3 $m^2$ )	Metal (sem TB), Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)	PVC – fixo e horizontal 30°	Poliestireno Expandido (EPS) 0,03m	13 $m^2$
3	2.257,00	13.267	Bomba de calor e painel solar térmico: sistema de termossifão (5 $m^2$ )	Metal (sem TB), Vidros Duplos Ar (4mm + 6mm + 4mm)	Sem mecanismo	Painel de Cortiça Expandida 0,06m	11 $m^2$
4	5.428,60	12.901	Termoacumulador e painel solar térmico: sistema de termossifão (5 $m^2$ )	Original	Sem mecanismo	Poliestireno Expandido (EPS) 0,03m	11 $m^2$

**Tabela 5.19** - Continuação da caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando é requerida a satisfação das necessidades de arrefecimento.

Ponto	Balço Energético ( $kWh_{ep}/(ano \cdot m^2)$ )	LCC (€/m <sup>2</sup> )	$\frac{N_i}{m^2 \cdot ano}$ ( $\frac{kWh}{m^2 \cdot ano}$ )		$\frac{N_v}{m^2 \cdot ano}$ ( $\frac{kWh}{m^2 \cdot ano}$ )		$\frac{U_j}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ( $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ )		$\frac{U_p}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ( $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ )		$F_o \cdot F_f$	%REN <sup>15</sup>
1	12,1	144,79	18,85	-57% <sup>16</sup>	35,42	+8% <sup>17</sup>	2,69	-33% <sup>18</sup>	0,48	-72% <sup>19</sup>	0,9	69,7%
2	13,5	138,97	24,29	-45% <sup>16</sup>	30,84	-5% <sup>17</sup>	2,69	-33% <sup>18</sup>	0,77	-55% <sup>19</sup>	0,8	69,0%
3	23,0	135,24	25,10	-43% <sup>16</sup>	33,32	+2% <sup>17</sup>	4,02	+0,6% <sup>18</sup>	0,52	-70% <sup>19</sup>	0,9	52,5%
4	55,3	131,51	28,75	-35% <sup>16</sup>	33,17	+2% <sup>17</sup>	3,9967	0% <sup>18</sup>	0,77	-55% <sup>19</sup>	0,9	31,5%

<sup>15</sup> Este valor tem apenas em consideração a energia produzida pelo painel solar fotovoltaico face à energia primária consumida pelos vários aparelhos.

<sup>16</sup> Em comparação com o valor de necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do espaço da habitação de referência.

<sup>17</sup> Em comparação com o valor de necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento do espaço da habitação de referência.

<sup>18</sup> Em comparação com o valor do coeficiente de transmissão térmica das janelas da habitação de referência.

<sup>19</sup> Em comparação com o valor do coeficiente de transmissão térmica das paredes exteriores da habitação de referência.

Em primeiro lugar, é importante salientar que o aumento da dimensão da população para 300 indivíduos, permitiu a obtenção resultados que reforçariam a Curva de Pareto descrita na Subsecção 5.5.1 e, inclusive, encontrou um “Ponto 2”, melhor que o “Ponto 2” resultante da execução do modelo inicial.

Além disso, a partir do levantamento das soluções obtidas, sabe-se que em todas elas, as necessidades nominais anuais de energia útil para o arrefecimento do espaço são sempre superiores ao valor estipulado. Como tal, a restrição imposta esteve sempre ativa e, conseqüentemente, o ar condicionado foi sempre o aparelho utilizado para o aquecimento e arrefecimento do ambiente.

Da resolução do modelo reformulado, resultaram quatro soluções não-dominadas (unidas na Figura 5.6 pelos segmentos de reta a azul), caracterizadas pelos valores apresentados nas Tabelas 5.18 e 5.19. Destas soluções, a do “Ponto 4” - o ponto cujo valor no eixo vertical é menor – é uma solução que, do ponto de vista prático, não é útil. O seu valor de custos do ciclo de vida só é conseguido devido ao não-investimento quer num mecanismo de sombreamento, quer na substituição das janelas. Assim, se o objetivo é a reabilitação do edifício para que seja atingida uma maior eficiência energética, esta solução não é a mais adequada.

Para as restantes soluções encontradas, é relevante perceber que, mesmo quando é necessário satisfazer as necessidades energéticas de arrefecimento de espaço, é possível conseguir um balanço energético por unidade de área igual a  $12,1 \text{ kWhep}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$ . Esta conclusão ganha maior relevância quando se observa que a solução referida exige apenas mais 4,02% dos custos totais do ciclo de vida que a solução imediatamente à direita (de  $13,5 \text{ kWhep}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$ ) e mais 6,60% que a solução com um balanço energético de  $23,0 \text{ kWhep}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$ .

### **5.6.3 Cumprimento dos valores limite para as necessidades nominais anuais de energia útil definidos pela legislação**

Por fim, a última análise ao modelo inicial veio acrescentar-lhe várias alterações. Assim, primeiramente, adicionou-se uma restrição que torna obrigatória a satisfação das necessidades de arrefecimento de espaço (independentemente do seu valor). Em segundo lugar, incluiu-se uma penalização na função-objetivo da minimização do balanço energético sempre que não é cumprida a legislação que determina os valores máximos para as necessidades nominais de energia útil de aquecimento e arrefecimento de espaço (Portaria nº349-B/2013). Por último, para que o modelo tivesse maior liberdade a encontrar soluções que minimizem as necessidades de arrefecimento, foi retirada a restrição que limita a seleção de opções de sombreamento (já que nesta se considera o fator de sombreamento do horizonte, por obstruções exteriores ao edifício ou por outros elementos do edifício, mais restritivo - o da estação de aquecimento).

Antes de avançar para a análise de resultados obtidos com esta reformulação do modelo, importa mencionar o que é imposto no DL 118/2013 para limitar os valores das necessidades nominais de energia útil de aquecimento e arrefecimento do espaço dos edifícios. Deste modo, a Tabela 5.20 sintetiza as razões máxima  $N_i/N_{imax}$  e  $N_v/N_{vmax}$  permitidas por lei para edifícios sujeitos a grande intervenção, consoante o ano de construção do edifício -  $N_{imax}$  e  $N_{vmax}$  são os valores limite calculados

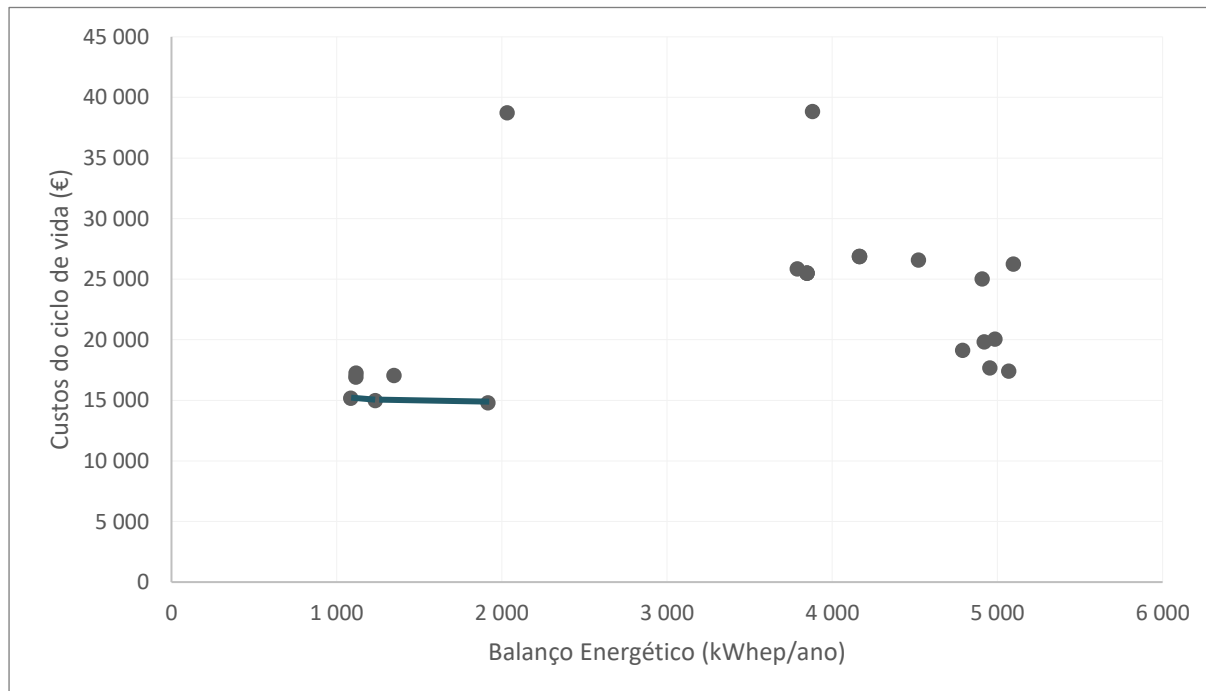
para um edifício de referência (cujas características dependem do edifício em estudo) conforme as indicações da Portaria nº349-B/2013. No caso de edifícios de habitação novos, o valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento e arrefecimento não pode exceder o valor máximo correspondente ( $N_i/N_{imax} < 1$  e  $N_v/N_{vmax} < 1$  - Art. 26º DL 118/2013).

**Tabela 5.20** - Relação entre os valores das necessidades nominais e limite, de energia útil para aquecimento e arrefecimento de edifícios sujeitos a grandes intervenções – adaptado da Portaria nº349/B-2013.

Ano de Construção	$N_i/N_{imax}$	$N_{iv}/N_{cmax}$
Anterior a 1960	Não aplicável	Não aplicável
Entre 1960 e 1990	1,25	1,25
Posterior a 1990	1,15	1,15

Tendo por base os valores da Tabela 5.20 e sabendo que o edifício de referência definido foi construído no período entre 1960 e 1990 (conclusão retirada a partir dos dados dos Censos de 2011), foi imposta uma penalização no modelo sempre que as razões  $N_i/N_{imax} > 1,25$  e  $N_v/N_{vmax} > 1,25$  (como referido anteriormente  $N_{imax} = 25,38 kWh/(m^2.ano)$  e  $N_{vmax} = 20,74 kWh/(m^2.ano)$ ) não fossem cumpridas.

Por conseguinte, a Figura 5.7 mostra os resultados obtidos da execução desta reformulação do modelo. A dimensão da população para esta execução do modelo foi de 300 indivíduos, para que fosse possível encontrar mais resultados.



**Figura 5.7** - Resultados obtidos da execução do modelo quando é requerido o cumprimento dos valores limite para as necessidades nominais anuais de energia útil definidos pela legislação.

Três das soluções encontradas são não-dominadas, ou seja, formam a Curva de Pareto delimitada no gráfico pela linha a azul. As características de cada um dos pontos dados por essas soluções são apresentadas nas Tabelas 5.21 e 5.22.

**Tabela 5.21** - Caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando é requerido o cumprimento da legislação para o valor limite das necessidades nominais anuais de energia útil para o aquecimento e arrefecimento do espaço.

Ponto	Balanco Energético ( $kWh_{ep}/ano$ )	LCC (€)	Mecanismo de aquecimento de águas sanitárias	Mecanismo de aquecimento de espaço	Mecanismo de arrefecimento de espaço	Material das janelas	Mecanismo de sombreamento	Material de isolamento térmico	Dimensão do painel solar fotovoltaico
1	1.086,00	15.172	Caldeira a biomassa e painel solar térmico: sistema de termossifão ( $3 m^2$ )	Ar condicionado	Ar condicionado	Metal (sem TB), Vidros duplos, árgon (6mm+10mm+6mm)	Metal - <i>overhang</i> e fixo - 45°	Painel de cortiça expandida 0,08m	$13 m^2$
2	1.234,40	14.993	Caldeira a biomassa e painel solar térmico: sistema de termossifão ( $3 m^2$ )	Ar condicionado	Ar condicionado	Metal (sem TB), Vidros duplos, árgon (6mm+10mm+6mm)	Metal - horizontal e fixo - 45°	Poliestireno Extrudido (XPS) 0,05m	$13 m^2$
3	1.916,80	14.816	Bomba de calor e painel solar térmico: sistema de termossifão ( $5 m^2$ )	Ar condicionado	Ar condicionado	Metal (sem TB), Vidros duplos, ar (4mm+6mm+4mm)	Metal - horizontal e fixo - 45°	Lã de Rocha 0,08m	$11 m^2$

**Tabela 5.22** - Continuação da caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando é requerido o cumprimento da legislação para o valor limite das necessidades nominais anuais de energia útil para o aquecimento e arrefecimento do espaço.

Ponto	Balanco Energético ( $kWh_{ep}/(ano. m^2)$ )	LCC (€/m <sup>2</sup> )	$\frac{N_i}{(m^2. ano)}$ ( $\frac{kWh}{m^2. ano}$ )		$\frac{N_v}{(m^2. ano)}$ ( $\frac{kWh}{m^2. ano}$ )		$\frac{U_j}{(m^2. °C)}$ ( $\frac{W}{m^2. °C}$ )		$\frac{U_p}{(m^2. °C)}$ ( $\frac{W}{m^2. °C}$ )		$F_o. F_f$	%REN <sup>20</sup>
1	11,1	154,66	24,58	-44% <sup>21</sup>	25,49	-22% <sup>22</sup>	3,6	-10% <sup>23</sup>	0,41	-76% <sup>24</sup>	0,69	73,1%
2	12,6	152,83	27,05	-39% <sup>21</sup>	25,26	-23% <sup>22</sup>	3,6	-10% <sup>23</sup>	0,57	-67% <sup>24</sup>	0,69	70,5%
3	19,5	151,03	26,06	-41% <sup>21</sup>	24,96	-24% <sup>22</sup>	4,02	+0,6% <sup>23</sup>	0,38	-78% <sup>24</sup>	0,69	56,6%

<sup>20</sup> Este valor tem apenas em consideração a energia produzida pelo painel solar fotovoltaico face à energia primária consumida pelos vários aparelhos.

<sup>21</sup> Em comparação com o valor de necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do espaço da habitação de referência.

<sup>22</sup> Em comparação com o valor de necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento do espaço da habitação de referência.

<sup>23</sup> Em comparação com o valor do coeficiente de transmissão térmica das janelas da habitação de referência.

<sup>24</sup> Em comparação com o valor do coeficiente de transmissão térmica das paredes exteriores da habitação de referência.

Em primeiro lugar, com a atual reformulação do modelo de otimização, este vai ao encontro do que é requerido atualmente pela legislação portuguesa para o comportamento térmico dos edifícios de habitação. No entanto, apesar de ter sido retirada a restrição imposta pela legislação dada pela expressão (4-39), o valor obtido para o fator de sombreamento  $F_o.F_f$  é, em todas as soluções não-dominadas, igual a 0,69, um valor muito próximo ao de 0,70 que seria o seu limite com a ativação da restrição. Como tal, se forem considerados arredondamentos e aproximações, as soluções da frente de Pareto deste novo modelo, são tidas como adequadas, respeitando os limites definidos pela legislação. Por conseguinte, a análise destes resultados é mais pertinente que a dos devolvidos pelo modelo inicial.

A partir da análise das soluções não-dominadas encontradas com a execução do modelo reformulado, conclui-se que a obrigação do cumprimento dos valores limite para as necessidades energéticas provocou uma diminuição, de modo geral, nos custos do ciclo de vida. A principal razão para que isto se verifique é devida à consequente redução dos custos de operação dos aparelhos (já que o consumo energético para que sejam satisfeitas as necessidades de energia útil de aquecimento e arrefecimento do ambiente e preparação de AQS é forçosamente menor).

As soluções da Curva de Pareto foram, desta vez, analisadas com detalhe, tendo sido notada a existência do sobredimensionamento do painel solar fotovoltaico – não tinha sido imposto ao modelo que o painel solar fotovoltaico só produzisse, no máximo, o valor de eletricidade consumida pelos aparelhos de aquecimento e arrefecimento de espaço e preparação de AQS. Assim, foram recalculados os valores das funções-objeto para as soluções não-dominadas que haviam sido obtidas. Desta forma, a Tabela 5.23 demonstra os novos valores para o balanço energético e o custo do ciclo de vida com o redimensionamento do painel solar térmico. Destes resultados, é possível observar que a existência de uma inversão na posição das soluções, a que anteriormente minimizava mais o balanço energético é a que agora minimiza os custos do ciclo de vida e vice-versa.

**Tabela 5.23** - Caracterização das soluções quando do redimensionamento do painel solar fotovoltaico.

Ponto	Balanço Energético* ( $kWh_{ep}/ano$ )	LCC* (€)	Balanço Energético* ( $kWh_{ep}/(ano.m^2)$ )	LCC* (€/m <sup>2</sup> )	%Painel Solar Fotovoltaico <sup>25</sup>	%REN <sup>26</sup>	Nova dimensão do painel solar fotovoltaico
1	2.902,00	11.888	29,58	121,19	48,5%	62,1%	5 m <sup>2</sup>
2	2.823,40	12.120	28,78	123,55	56,8%	84,0%	6 m <sup>2</sup>
3	2.597,80	13.584	26,48	138,48	100%	100%	8 m <sup>2</sup>

Avaliando as soluções quando a dimensão do painel solar fotovoltaico foi ajustada para as necessidades de autoconsumo, os valores para o balanço energético por unidade de área variam agora entre 26,48  $kWh_{ep}/(m^2.ano)$  e 29,58  $kWh_{ep}/(m^2.ano)$ . Assim, com um aumento de 12,5% nos LCC,

<sup>25</sup> Valor de energia produzida pelo painel solar fotovoltaico face ao valor da energia consumida em termos de energia final (quando é considerado que o painel solar térmico contribui para a redução do consumo de energia).

<sup>26</sup> Valor de energia produzida por painéis solares térmico e fotovoltaico face ao valor de energia total consumida.

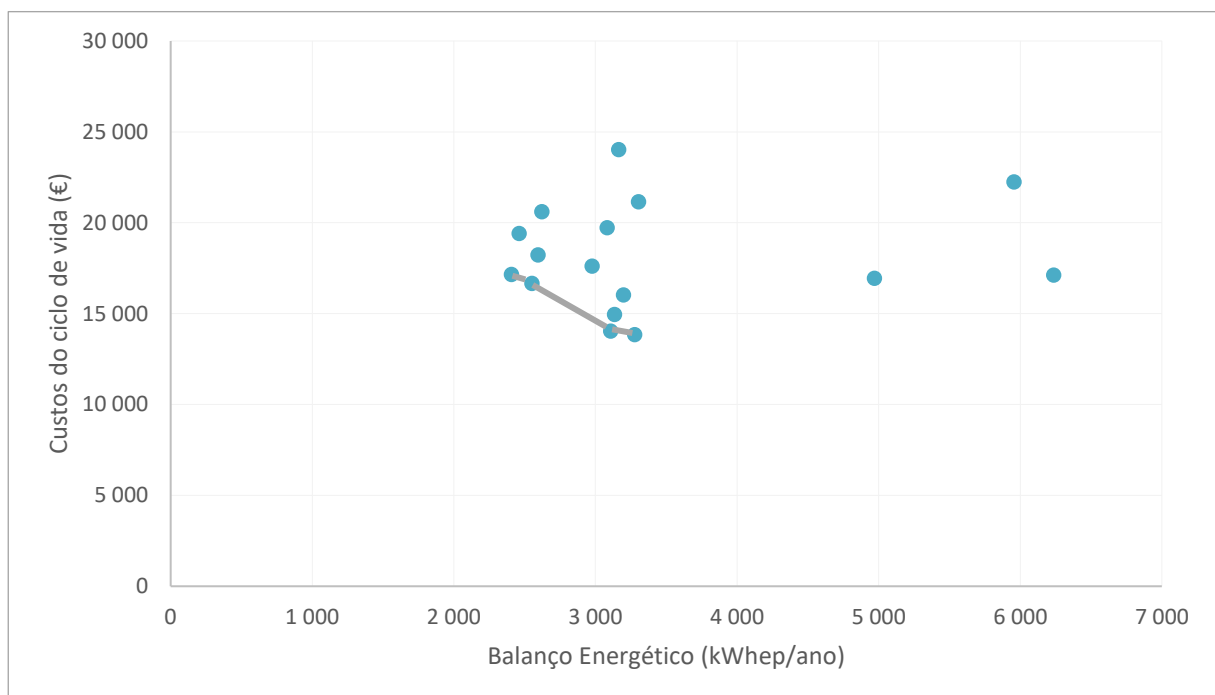
passa-se da solução que minimiza os custos (mas que tem um balanço energético maior), para a solução que minimiza o balanço energético. Para além destes valores, realce-se a percentagem da energia final consumida coberta pela energia produzida pelo painel solar fotovoltaico (%Painel Solar Fotovoltaico) - esta varia entre 48,5% a 100%. O mesmo intervalo passa a ser de 84% a 100% quando se considera a energia produzida pelo total dos painéis solares em função da energia final consumida para satisfação das necessidades energéticas (%REN).

Ainda, como nota adicional, é importante referir que o modelo foi testado para o cumprimento dos requisitos máximos para as necessidades nominais de energia útil para o aquecimento e arrefecimento de espaço de edifícios novos. Contudo, os resultados obtidos com esta execução do modelo não conseguiam evitar as penalizações. Isto pode acontecer por duas razões: a primeiro, porque o modelo foi executado através do algoritmo genético - que tem a limitação de ser uma metaheurística; a segunda, porque o comportamento térmico do edifício pode estar a ser limitado pela estrutura física do edifício - talvez a área ou a orientação das janelas e paredes exteriores não sejam as mais apropriadas.

#### 5.6.4 Painel solar fotovoltaico a produzir para autoconsumo

Como complemento à análise desenvolvida em 5.6.3, adicionou-se ao último modelo construído uma penalização para que o painel solar fotovoltaico produzisse apenas para autoconsumo. Assim, a energia produzida pelo painel seria igual ou inferior ao total do consumo de eletricidade para aquecimento e arrefecimento do ambiente e preparação de AQS.

No entanto, é importante salientar que esta consideração fez aumentar a complexidade do modelo. Notou-se, por isso, uma acrescida dificuldade na sua execução de tal forma que, para a obtenção de uma maior variedade de resultados, foi necessário aumentar a dimensão da população, dos anteriores 300 para 1.000 indivíduos. As soluções então obtidas encontram-se na Figura 5.8 e nas Tabelas 5.24 e 5.25.



**Figura 5.8** - Resultados obtidos da execução do modelo com limitação do painel solar fotovoltaico a produzir para autoconsumo.

**Tabela 5.24** - Caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando o painel solar fotovoltaico produz apenas para autoconsumo.

Ponto	Balanco Energético ( $kWh_{ep}/ano$ )	LCC (€)	Mecanismo de aquecimento de águas sanitárias	Material das janelas	Mecanismo de sombreamento	Material de isolamento térmico	Dimensão do painel solar fotovoltaico
1	2.407,20	17.142	Bomba de calor e painel solar térmico: sistema de termossifão (6 $m^2$ )	Metal (sem TB), Vidros Duplos Ar (6mm+6mm+6mm)	Metal – <i>overhang</i> e fixo 45°	Poliestireno Expandido (EPS) 0,06m	7 $m^2$
2	2.551,70	16.654	Bomba de calor e painel solar térmico: sistema de termossifão (6 $m^2$ )	Original	Madeira –horizontal e fixo 45°	Painel de Cortiça Expandida 0,05m	7 $m^2$
3	3.107,50	14.039	Bomba de calor e painel solar térmico: sistema de termossifão (4 $m^2$ )	Original	Metal –horizontal e fixo 45°	Lã de Rocha 0,04m	9 $m^2$
4	3.276,40	13.850	Bomba de calor e painel solar térmico: sistema de termossifão (4 $m^2$ )	Original	PVC – horizontal e móvel 45°	Painel de Cortiça Expandida 0,05m	8 $m^2$

**Tabela 5.25** - Continuação da caracterização das soluções não-dominadas devolvidas pela execução do modelo quando o painel solar fotovoltaico produz apenas para autoconsumo.

Ponto	Balanco Energético ( $kWh_{ep}/(ano. m^2)$ )	LCC (€/m <sup>2</sup> )	$N_i$ ( $\frac{kWh}{m^2. ano}$ )		$N_v$ ( $\frac{kWh}{m^2. ano}$ )		$U_j$ ( $\frac{W}{m^2. °C}$ )		$U_p$ ( $\frac{W}{m^2. °C}$ )		$F_o. F_f$	%REN <sup>27</sup>
1	24,5	174,74	26,98	-39% <sup>28</sup>	24,94	-24% <sup>29</sup>	3,95	-1% <sup>30</sup>	0,46	-73% <sup>31</sup>	0,69	39,8%
2	26,0	169,77	29,40	-33% <sup>28</sup>	24,69	-24% <sup>29</sup>	3,9967	0% <sup>30</sup>	0,60	-65% <sup>31</sup>	0,69	38,4%
3	31,7	143,11	30,36	-31% <sup>28</sup>	24,61	-25% <sup>29</sup>	3,9967	0% <sup>30</sup>	0,66	-62% <sup>31</sup>	0,69	33,3%
4	33,4	141,18	29,40	-33% <sup>28</sup>	24,69	-24% <sup>29</sup>	3,9967	0% <sup>30</sup>	0,60	-65% <sup>31</sup>	0,69	35,7%

<sup>27</sup> Este valor tem apenas em consideração a energia produzida pelo painel solar fotovoltaico face à energia primária consumida pelos vários aparelhos.

<sup>28</sup> Em comparação com o valor de necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do espaço da habitação de referência.

<sup>29</sup> Em comparação com o valor de necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento do espaço da habitação de referência.

<sup>30</sup> Em comparação com o valor do coeficiente de transmissão térmica das janelas da habitação de referência.

<sup>31</sup> Em comparação com o valor do coeficiente de transmissão térmica das paredes exteriores da habitação de referência.

Com a introdução no modelo desta limitação, é beneficiada a seleção das opções que consomem eletricidade em alternativa ao gás natural ou à biomassa, já que esta é produzida pelo painel solar fotovoltaico, levando à diminuição dos custos de operação ao longo do ciclo de vida. No entanto, o mesmo não acontece quando se avalia o balanço energético uma vez que este é afetado pelo consumo de energia primária destes aparelhos (devido ao valor do seu fator de conversão).

Um fator comum às soluções obtidas é a existência de apenas aparelhos elétricos. Em concreto, nota-se a preferência pela bomba de calor para preparação de AQS que é justificada pela sua elevada eficiência. Já no caso do ar condicionado, este foi selecionado porque estava ativa a restrição que obriga à satisfação das necessidades de arrefecimento do espaço.

Numa análise mais pormenorizada a cada uma das soluções, repara-se que o “Ponto 2” e o “Ponto 4” requerem as mesmas necessidades energéticas, mas, no entanto, apresentam valores para o balanço energético e LCC diferentes. A principal diferença entre estes consiste na utilização do painel solar térmico para aquecimento de águas sanitárias. No “Ponto 2” o painel solar térmico é maior, assim, há uma redução na energia consumida pela bomba de calor e, como consequência, no balanço energético. Por outro lado, é possível constatar que a diferença em 2 m<sup>2</sup> no painel solar térmico implica a variação de 1 m<sup>2</sup> no painel solar fotovoltaico. Este último tem um custo inferior e uma capacidade de produção de energia superior, resultando assim no valor de LCC mais baixo para o “Ponto 4”.

Ainda, um dos aspetos que gerou a diferença nos custos entre as várias soluções foi o mecanismo de sombreamento. É de notar que o fator de sombreamento foi comum entre todas as soluções, todavia, o diferente custo de investimento em cada um dos mecanismos teve impacto na função dos custos. Para além deste, a não alteração das janelas em três das soluções não-dominadas, permitiu que o LCC fosse menor apesar do consequente aumento das necessidades para aquecimento de espaço.

Com as soluções obtidas repara-se que é possível alcançar um balanço energético de 24,5  $kWh_{ep}/(m^2 \cdot ano)$  quando o painel solar fotovoltaico tem a sua dimensão ajustada para autoconsumo. Porém, este valor é atingido à custa de um incremento de 26% face à solução de 26,48  $kWh_{ep}/(m^2 \cdot ano)$  apresentada na Tabela 5.23. Também, é relevante realçar que as soluções apresentadas pelos “Ponto 3” e “Ponto 4” são piores, em ambas as funções-objetivo, que as soluções não-dominadas obtidas na análise descrita em 5.6.3 quando a dimensão do painel foi ajustada para autoconsumo. Isto sublinha a limitação da aplicação do algoritmo genético relacionada com a não obtenção de soluções ótimas.

Por último, a percentagem de energia primária consumida coberta pela produção do painel solar fotovoltaico apresentada por estas soluções é um valor com pouco interesse para a análise, visto que o que o determina é o fator de conversão para energia primária da eletricidade. De outro modo, avaliando o consumo em energia final, a mesma percentagem seria de praticamente 100%, não alcançando este valor apenas pelo facto de a área do painel solar fotovoltaico ser um número inteiro e de, portanto, esta não estar completamente ajustada ao consumo. Assim, para qualquer uma das opções apresentadas pelos pontos de 1 a 4, esta representaria uma habitação energeticamente auto-sustentável (bastando para isso que os picos de consumo estivessem ajustados com os picos de produção).

## 5.7 Recomendações

Primeiramente, a análise dos resultados iniciais permitiu fazer consecutivos ajustes ao modelo por forma a melhorar a sua adequação ao problema. Por conseguinte, o último modelo formulado é considerado melhor que o modelo inicialmente desenvolvido. Contudo, e como crítica ao modelo inicialmente construído, para um estudo ainda mais próximo da realidade, deveria ter sido adicionada uma restrição que evitasse o sobredimensionamento do painel solar fotovoltaico. Apesar disso, este sobredimensionamento poderia ter sido aproveitado se houvesse a venda do excedente de eletricidade produzida à rede (esta opção teria de ser analisada com pormenor já que acarreta outros custos e obrigações).

Em segundo lugar, importa ressaltar que o edifício de referência utilizado para o desenvolvimento do caso de estudo é um edifício hipotético, cujos valores são dados pela média dos edifícios do município de Lisboa. Deste modo, todas as soluções que minimizam os custos do ciclo de vida implicando a inexistência de alterações nas janelas nem no material de isolamento térmico ou, sem que sejam incluídos mecanismos de sombreamento, não devem ser consideradas - uma vez que, na vida real, o edifício com aquelas características não existe.

Assim, da análise de resultados é possível concluir que a transposição da Diretiva 2010/31/UE para Portugal, no caso de um edifício residencial localizado no município de Lisboa sujeito a grande intervenção, pode incluir os seguintes requisitos com vista a atingir o objetivo nZEB: o indicador numérico para a energia primária igual a, no máximo,  $29,58 \text{ kWhep}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$  e a quota-parte de renováveis – em termos de energia final - equivalente a pelo menos 48,5% (se não for considerada a energia renovável produzida por soluções que satisfazem diretamente as necessidades energéticas para a preparação de AQS) ou de 62,1% (se, por outro lado, essa energia for considerada).

## 5.8 Conclusões do capítulo

O caso de estudo descrito neste capítulo consistiu na aplicação do modelo de otimização multiobjetivo a uma habitação de um edifício residencial localizado no município de Lisboa. Para a definição das características deste edifício foram determinados os valores médios calculados a partir dos dados dos Censos de 2011. Ainda, para que fosse possível a aplicação do modelo, foi realizado um levantamento dos restantes parâmetros a partir das fontes relevantes.

Para a execução do modelo de otimização, foi necessário transformá-lo de multiobjetivo para um só objetivo. Deste modo, foi possível correr o modelo recorrendo ao *software* MATLAB e à sua função “ga()” que utiliza o algoritmo genético para a obtenção de soluções. No entanto, o facto da abordagem utilizada para a resolução do modelo não ser exata, tornou impossível garantir que a execução do modelo devolvesse as soluções ótimas.

A análise dos resultados inicialmente obtidos permitiu realizar consecutivos ajustes ao modelo. Desta forma, adaptou-se a dimensão da população - para que o algoritmo genético obtivesse mais e

melhores soluções. Para além disso, as demais conclusões retiradas da análise foram, posteriormente, estudadas na secção da análise de sensibilidade a partir de reformulações do modelo.

Na análise de sensibilidade, o balanço energético foi avaliado em termos de energia final. Assim, observou-se que é possível alcançar mais facilmente o conceito de edifícios de balanço energético nulo quando este é antes avaliado em energia final do que quando avaliado segundo energia primária.

Posteriormente, impôs-se a obrigatoriedade de satisfação das necessidades energéticas de arrefecimento sempre que as necessidades nominais anuais de energia útil para o arrefecimento do espaço ultrapassassem as exigidas atualmente por lei. Neste contexto, a principal conclusão remete para a limitação do algoritmo genético, já que o aumento da complexidade do modelo obrigou ao aumento da dimensão da população, para que os valores devolvidos fossem mais próximos dos obtidos anteriormente para situações em que o ar condicionado foi utilizado sem que essa restrição estivesse ativa. Porém, o aumento da população permitiu alcançar soluções melhores.

Depois, como as soluções não-dominadas que foram sendo obtidas não cumpriam o valor máximo da relação entre os valores das necessidades nominais e limite, de energia útil para aquecimento e arrefecimento de espaço definido por lei, foi imposta essa penalização ao modelo. Desta forma, obteve-se um novo conjunto de soluções não-dominadas no qual se observou a existência de um sobredimensionamento do painel solar fotovoltaico. Consequentemente, as características dessas soluções foram corrigidas para a situação em que a dimensão do painel solar fotovoltaico está ajustada para o autoconsumo (considerando apenas os consumos de energia para aquecimento e arrefecimento do ambiente e preparação de AQS). Como tal, para que um edifício residencial, com as características médias dos edifícios localizados no município de Lisboa, sujeito a obras de grande intervenção, atinja o objetivo nZEB, o seu balanço de energia primária deve ser no máximo igual  $29,58 \text{ kWh}_{ep}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$  e a quota-parte de renováveis – em termos de energia final - equivalente a pelo menos 48,5% (se não for considerada a energia produzida por painéis solares térmicos) ou de 62,1% (se, por outro lado, essa energia for considerada).

Por fim, foi adicionada ao modelo uma penalização para que não existisse um excesso de produção através do painel solar fotovoltaico. No entanto, desta aplicação do modelo o que há a destacar é a limitação decorrente do uso de metaheurísticas visto que algumas das soluções não-dominadas obtidas são piores que as determinadas na análise imediatamente anterior, aquando da correção dos valores para o ajuste da dimensão do painel solar fotovoltaico.

## 6. CONCLUSÕES

A construção e reabilitação de edifícios em Portugal tem agora um novo objetivo: alcançar balanços energéticos quase nulos.

Desde 2010 que o conceito de edifícios de balanço energético quase nulo passou a integrar a diretiva para o desempenho energético dos edifícios (com a reformulação da anterior). Este conceito sugere que os edifícios novos, ou sujeitos a grande intervenção, sejam (a partir de 2018, no caso de edifícios ocupados e detidos por autoridades públicas ou, a partir de 2020, para os restantes) edifícios com necessidades energéticas reduzidas, com tais necessidades residuais satisfeitas, em grande parte, por energia renovável.

Consequentemente, a Diretiva referida impõe que cada Estado-Membro estabeleça requisitos mínimos para o desempenho energético e para a implementação de sistemas de produção de energia renovável a fim de ser promovida a conceção de edifícios nZEB. Para tal, estes deverão ser definidos segundo uma lógica custo-ótimo, requerendo, por isso, uma análise multiobjetivo.

Desta forma, torna-se pertinente recorrer à otimização multiobjetivo para avaliar que requisitos podem reduzir o balanço energético ao mesmo tempo que apresentam um custo, ao longo do ciclo de vida económico do edifício, baixo. Assim, é necessária a avaliação simultânea de dois objetivos conflitantes: a minimização do balanço energético e a minimização de custos globais. Como tal, foram analisados vários trabalhos de investigação que abordaram temáticas idênticas à do problema. A partir dessa análise foi concluído que a abordagem por metaheurísticas - para o aumento da eficiência computacional na pesquisa de soluções não-dominadas - é a mais comum. Dentro desta abordagem o método utilizado maioritariamente é o NSGA-II – uma variante do algoritmo genético tradicional.

Partindo da revisão ao estado da arte, foi possível formular um modelo de otimização multiobjetivo que serviu de base para avaliar diferentes medidas passíveis de serem aplicadas na construção ou reabilitação de um edifício.

Por conseguinte, para a aplicação do modelo de otimização a um caso de estudo, definiu-se um edifício de referência, cujas características foram determinadas a partir dos valores médios obtidos dos Censos de 2011 para os edifícios situados no município de Lisboa.

Tendo sido estabelecidos todos os parâmetros necessários, implementou-se o modelo no *software* MATLAB. Todavia, para a execução do modelo foi necessário tornar as duas funções-objetivo numa só função (correspondente à minimização simultânea dos dois objetivos). Assim, multiplicou-se cada uma das funções-objetivo por um coeficiente, que foi variando para que fosse possível encontrar várias soluções na Curva de Pareto.

Para a execução do modelo, recorreu-se à função “ga()” do MATLAB, que utiliza o algoritmo genético para proceder à otimização. Este, porém, revelou algumas limitações, obrigando ao aumento da dimensão da população para que fossem obtidas mais e melhores soluções – sem que, no entanto, fosse conseguida uma convergência das mesmas.

A análise dos resultados obtidos da aplicação do modelo ao caso de estudo permitiu realizar consecutivos ajustes ao modelo por forma a melhorar a sua adequação ao problema. Como tal, o modelo mais recente, comparando com o inicial, requer o cumprimento dos requisitos impostos pela legislação (definidos no DL 118/2013 e na Portaria nº349/B-2013) para os valores limites das necessidades nominais anuais de energia útil para o aquecimento e arrefecimento do espaço. Contudo, das soluções não-dominadas encontradas por essa análise de sensibilidade, foi possível perceber que os resultados, até então obtidos, estavam enviesados já que existia um sobredimensionamento do painel solar fotovoltaico.

Após esse reparo, foram corrigidos os valores das soluções obtidas pelo modelo mais recentemente construído, através do ajuste da dimensão do painel solar fotovoltaico às necessidades de autoconsumo. Deste modo, foi determinado o balanço energético que deverá ser considerado como indicador numérico para a energia primária de um edifício residencial nZEB com as características médias dos edifícios localizados no município de Lisboa e sujeito a obras de grande intervenção. O indicador referido corresponde a  $29,58 \text{ kWhep}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$ . Para que este valor possa ser inferior (como acontece na definição do indicador equivalente para um edifício na Dinamarca), o governo português tem de apostar em medidas financeiras de incentivo à implementação de opções energeticamente mais eficientes.

Ainda, a partir desses valores, concluiu-se que a quota-parte de renováveis – em termos de energia final – deve ser no mínimo de 48,5% (se não for considerada a energia renovável produzida por soluções que satisfazem diretamente as necessidades energéticas para a preparação de AQS) ou de 62,1% (se, por outro lado, essa energia for considerada). Mais uma vez, estes valores serão válidos para um edifício residencial situado no município de Lisboa.

Por fim, é de reforçar a importância do aproveitamento da energia solar. A colocação de painéis solares térmicos e fotovoltaicos pode ser suficiente para satisfazer por completo as necessidades de aquecimento e arrefecimento de espaço e de preparação de AQS.

## 6.1 Trabalho futuro

Para o desenvolvido futuro da presente investigação será, em primeiro lugar, relevante, experimentar a execução do modelo mantendo-o multiobjetivo. Para tal, para que a função “gamultiobj()” do MATLAB possa ser utilizada, deverão impor-se penalizações, com o intuito de que sejam cumpridas as restrições, e arredondamentos às variáveis de decisão, por forma a que o modelo as considere como inteiras. Ainda, se possível, deverá ser experimentada a execução do modelo noutros *softwares* para comparar a capacidade de resolução do problema.

Para além disso, o modelo deve ser ajustado para que considere, também, as necessidades energéticas de ventilação e de iluminação fixa, conforme é requerido pela Diretiva 2010/31/UE. Adicionalmente, devem-se integrar no modelo os custos de manutenção aquando do cálculo dos custos do ciclo de vida.

Depois, para que possam ser retiradas conclusões mais robustas, é importante que o modelo seja aplicado em vários cenários: diferentes localizações do edifício e diferentes tipos de edifício (casas isoladas, geminadas e em banda). Também, será interessante testar variações a parâmetros como os fatores de desconto e de evolução dos preços da energia e incluir no modelo mais opções de aparelhos que gerem energia renovável e mais opções de aparelhos que satisfaçam as necessidades energéticas – por exemplo, uma das limitações do presente modelo foi só ter uma opção disponível para a satisfação das necessidades energéticas de arrefecimento do espaço. Além do já referido, seria ainda importante fazer o levantamento dos custos de instalação das opções – este valor é mais determinante do que o custo de investimento que apenas está associado à aquisição dos equipamentos.

Finalmente, para que possam ser retiradas as devidas conclusões e recomendações que sustentem a definição da meta nZEB para Portugal, é fundamental que o modelo seja adaptado de forma a poder ser aplicado a edifícios de comércio e serviços e a edifícios construídos de raiz.

Como última nota, é importante salientar que todas as demais alterações à estrutura do modelo vão torna-lo mais complexo e, por isso, vão dificultar a sua resolução dadas as limitações dos *softwares* e métodos disponíveis.

## REFERÊNCIAS E OUTRA BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Aelenei, D., Aelenei, L., & Gonçalves, H. (2013). Edifícios de balanço energético nulo; Uma síntese das características principais. *Edifícios e Energia*, pp.70-74.
- Aelenei, D., Aelenei, L., & Santos, F. M. (2010). Standard Unretrofitted Buildings and Net Zero-Energy Concept. *Proceedings of EUROSUN 2010 International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings* (p. 6). Graz, Austria: LNEG.
- Antipova, E., Boer, D., Guillén-Gosálbez, G., Cabeza, L. F., & Jiménez, L. (2014). Multi-objective optimization coupled with life cycle assessment for retrofitting buildings. *Energy and Building*, 82, pp. 92-99.
- Asadi, E., Da Silva, M. G., Antunes, C. H., & Dias, L. (2012). A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. *Building and Environment*, 56, pp. 370-378.
- Asadi, E., Da Silva, M. G., Antunes, C. H., Dias, L., & Glicksman, L. (2014). Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application. *Energy and Buildings*, 81, pp. 444-456.
- Ascione, F., Bianco, N., De Stasio, C., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2015). A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance. *Energy and Buildings*, 88, pp. 78-90.
- Ascione, F., Bianco, N., De Stasio, C., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2016). Multi-stage and multi-objective optimization for energy retrofitting a developed hospital reference building: A new approach to assess cost-optimality. *Applied Energy*, 174, pp. 37-68.
- Attia, S. (2011). State of the Art of Existing Early Design Simulation Tools for Net Zero Energy Buildings: A Comparison of Ten Tools.
- Azari, R., Garshasbi, S., Amini, P., Rashed-Ali, H., & Mohammadi, Y. (2016). Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance. *Energy and Buildings*, 126, pp. 524-534.
- Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F., Gil, C., Alcayde, A., & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp 1753-1766.
- Boussaïd, I., Lepagnot, J., & Siarry, P. (2013). A survey on optimization metaheuristics. *Information Sciences*, 237, pp. 82-117.
- BPIE. (2010). *Cost Optimality Discussing methodology and challenges within the recast Energy Performance of Buildings Directive*. Brussels.
- BPIE. (2015). *Nearly Zero Energy Buildings Definitions Across Europe - Factsheet*. Brussels.

- Caldas, L. G., & Norford, L. K. (2002). A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in Construction*, 11, pp. 173-184.
- Carlucci, S., Cattarin, G., Causone, F., & Pagliano, L. (2015). Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). *Energy and Buildings*, 104, 378-394.
- CCE. (2005). *Livro Verde sobre a eficiência energética ou "Fazer mais com menos"*. Bruxelas: COMISSÃO DAS COMUNIDADES EUROPEIAS.
- COM. (2013). *RELATÓRIO DA COMISSÃO AO PARLAMENTO EUROPEU E AO CONSELHO Progressos dos Estados-Membros na via para edifícios com necessidades quase nulas de energia*. Bruxelas: Comissão Europeia.
- Commission, E. (2016). *2030 Energy Strategy*. Obtido em abril de 2016, de <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy/2030-energy-strategy>
- Crawley, D., Pless, S., & Torcellini, P. (2009). Getting to net zero. *ASHRAE Journal*, 51(9), p.18.
- Dasgupta, D. &. (1993). sGA: A Structured Genetic Algorithm. *Department of Computer Science, University of Strathclyde*.
- Delgarm, N., Sajadi, B., Kowsary, F., & Delgarm, S. (2016). Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). *Applied Energy*, 170, pp. 293-303.
- DGEG. (2014). *Estratégia Nacional para a Renovação de Edifícios - Portugal*.
- Diakaki, C., Grigoroudis, E., & Kolokotsa, D. (2008). Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*, 40, pp. 1747-1754.
- Ecofys. (2014). *Overview of Member States Information on NZEBs: Working version of the progress report - final report*.
- Eilhauer, U. E. (2015). *Optimization of integrated renewable energy system supplied for Net Zero Energy Buildings*. Master's Degree Thesis in Engineering Physics, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- European Commission. (2016). *2030 Energy Strategy*. Obtido em maio de 2016, de European Commission - Energy: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy/2030-energy-strategy>
- Gaterell, M., & McEvoy, M. (2005). The impact of climate change uncertainties on the performance of energy efficiency measures applied to dwellings. *Energy and Buildings*, 37, pp. 982-995.
- Gossard, D., Lartigue, B., & Thellier, F. (2013). Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network. *Energy and Buildings*, 67, pp. 253-260.

- Hamdy, M., Hasan, A., & Siren, K. (2013). A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010. *Energy and Buildings*, 56, pp. 189-203.
- Hasan, A. (2011). Optimal design of Net Zero Energy Buildings. *World Renewable Energy Congress 8-13 May 2011*. Linköping, Sweden.
- ICESD (2010). *Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010*. Lisboa-Portugal: Instituto Nacional de Estatística, I.P. e Direcção-Geral de Energia e Geologia.
- INE. (2015). *Estatísticas da Construção e Habitação-2014*. Lisboa-Portugal: Instituto Nacional de Estatística, I. P.
- Instituto Nacional de Estatística. *Censos 2011 - Importação dos principais dados alfanuméricos e geográficos (BGR)*. Obtido em junho de 2016, de <http://mapas.ine.pt/download/index2011.phtml>
- Junkers. (2016). *Junkers, Conforto para a vida*. Obtido em agosto de 2016, de <https://www.junkers.pt/>
- Konstantinou, T., & Knaack, U. (2011). Refurbishment of residential buildings: a design approach to energy-efficiency upgrades. *Procedia Engineering*, 21, pp. 666-675.
- KuantoKusta. (2016). *KuantoKusta - Encontre o melhor negócio*. Obtido em agosto de 2016, de <http://www.kuantokusta.pt/>
- Kurnitski, J., Buso, T., Litiu, A., Derjanecz, A., & Corgnati, S. P. (2014). nZEB definitions in Europe. *REHVA Journal, March*, pp. 6-9.
- Leroy Merlin. (2016). *Leroy Merlin, Produtos*. Obtido em agosto de 2016, de <http://www.leroymerlin.pt/Site/Produtos.aspx>
- Magnier, L., & Haghghat, F. (2010). Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Building and Environment*, 45, pp. 739-746.
- Malatji, E. M., Zhang, J., & Xia, X. (2013). A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision. *Energy and Buildings*, 61, pp. 81-87.
- Marla. (2016). *Recuperadores*. Obtido em agosto de 2016, de Marla: <http://www.marla.pt/recuperadores.php>
- Marszal, A., Heiselberg, P., Bourrelle, J., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43, pp. 971-979.
- Mlecnik, E. (2012). Defining nearly zero-energy housing in Belgium and the Netherlands. *Energy Efficiency*, 5, pp. 411-431.

- Monteiro, C. S., Silva, C. S., Sousa, J. M., Pina, A., & Ferrão, P. (2016). A methodology to optimize retrofit solutions for improving energy performance in buildings. *Sustainable Cities and Society Journal*.
- Murray, S. N., Walsh, B. P., Kelliher, D., & O'Sullivan, D. T. (2014). Multi-variable optimization of thermal energy efficiency retrofitting of buildings using static modelling and genetic algorithms - A case study. *Building and Environment*, 75, pp. 98-107.
- Penna, P., Prada, A., Cappelletti, F., & Gasparella, A. (2015). Multi-objectives optimization of Energy Efficiency Measures in existing buildings. *Energy and Buildings*, 95, pp. 57-69.
- PNAEE. (2016). Obtido em abril de 2016, de <http://www.pnaee.pt/pnaee>
- PORDATA. (2016). *Produção de energia eléctrica: total e a partir de fontes renováveis - Portugal*. Obtido em maio de 2016, de <http://www.pordata.pt/Portugal/Produ%C3%A7%C3%A3o+de+energia+el%C3%A9ctrica+total+e+a+partir+de+fontes+renov%C3%A1veis-1127>
- Quercus - Associação Nacional de Conservação da Natureza. (2008). *Projecto EcoFamílias- Relatório Final*.
- RePublic ZEB. (2015). *REFURBISHMENT OF THE PUBLIC BUILDING STOCK TOWARDS NZEB D3.1*.
- Santos, C. P. (2012). Reabilitação de edifícios para promoção do conforto e da eficiência energética. *Net Zero-Energy Buildings Conference Policies & Strategies, Underlying Concepts & Methodologies Applications & Solutions for Net-Zero Energy Buildings*. Lisboa: LNEG.
- Santos, P., Mateus, P., & Maldonado, E. (2011). *Implementation of the EPBD in Portugal Status in November 2010*. Concerted Action Energy Performance of Buildings.
- Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48, pp. 220-232.
- Serghides, D. K., Dimitriou, S., Kafatygiotou, M. C., & Michaelidou, M. (2015). Energy Efficient Refurbishment Towards Nearly Zero Energy Houses, For The Mediterranean Region. *Energy Procedia*, 83, pp. 533-543.
- Shao, Y., Geyer, P., & Lang, W. (2014). Integrating requirement analysis and multi-objective optimization for office building energy retrofit strategies. *Energy and Buildings*, 82, pp. 356-368.
- SolarWaters. (2016). *Caldeiras de Biomassa*. Obtido em agosto de 2016, de SolarWaters, eficiência energética: <http://www.solarwaters.pt/biomassa/caldeira#a1>
- Solius. (2014). *Solius| Calculadora de poupança*. Obtido em 25 de agosto de 2016, de <http://solius.pt/calculadora/>
- Son, H., & Kim, C. (2016). Evolutionary Multi-objective Optimization in Building Retrofit Planning Problem. *Procedia Engineering*, 145, pp. 565-570.

- Tadeu, S. F., Alexandre, R. F., Tadeu, A. J., Antunes, C. H., Simões, N. A., & Da Silva, P. P. (2016). A comparison between cost optimality and return on investment forenergy retrofit in buildings-A real options perspective. *Sustainable Cities and Society*, 21, pp. 12-25.
- Torcellini, P., Pless, S., & Deru, M. (2006). Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. *ACEEE Summer Study*. California: National Renewable Energy Laboratory.
- Voss, K., Musall, E., & Lichtmeß, M. (2011). From Low-Energy to Net Zero-Energy Buildings: Status and Perspectives. *Journal of Green Building*, 6(1), pp. 46-57.
- Voss, K., Sartori, I., & Lollini, R. (2012). Nearly-zero, Net zero and Plus Energy Buildings – How definitions & regulations affect the solutions. *REHVA Journal, Dec*, pp. 23-27.
- Vulcano. (2016). *Vulcano, Soluções de água quente*. Obtido em agosto de 2016, de <http://www.vulcano.pt/>
- Wang, B., Xia, X., & Zhang, J. (2014). A multi-objective optimization model for the life-cycle cost analysisand retrofitting planning of buildings. *Energy and Buildings*, 77, pp. 227-235.
- Wang, C., Martinac, I., & Magny, A. (2015). Multi-objective robust optimization of energy systems for a sustainable district in Stockholm. *14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Dec 7-9*. Hyderabad, India.
- Wang, W., Zmeureanu, R., & Rivard, H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithmsin green building design optimization. *Building and Environment*, 40, pp. 1512-1525.
- Worten. (2016). *Worten - Equipamentos para o seu lar*. Obtido em agosto de 2016, de <https://www.worten.pt/>
- Wright, J. A., Loosemore, H. A., & Farmani, R. (2002). Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 34, pp. 959-972.
- Ximenes, R. F. (2015). *Energy demand model to support the definition of sustainable energy systems*. Master's Degree Thesis in Mechanical Engineering, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

## LEGISLAÇÃO

- Decreto-Lei n.º 118/2013 . *Diário da República, 1.ª série — N.º 159 — 20 de agosto de 2013* (pp. 4988-5005). Ministério da Economia e do Emprego.
- Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013. *Diário da República, 2.ª série — N.º 234 — 3 de dezembro de 2013*, (pp. 35088-(14) - 35088-(25) ).
- Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013. *Diário da República, 2.ª série — N.º 234 — 3 de dezembro de 2013*, (pp. 35088-(26) - 35088-(31)).

Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013. *Diário da República*, 2.ª série — N.º 234 — 3 de dezembro de 2013, (pp. 35088-(41) - 35088-(54)).

Despacho (extrato) n.º 15793-D/2013. *Diário da República*, 2.ª série — N.º 234 — 3 de dezembro de 2013, (p. 35088-(13)).

Despacho n.º 15793-K/2013. *Diário da República*, 2.ª série — N.º 234 — 3 de dezembro de 2013, (pp. 35088-(58) - 35088-(87)).

Diretiva 2010/31/UE de 19 de maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). (2010). *Jornal Oficial da União Europeia* (pp. 13-35). Comissão Europeia.

Diretiva 2012/27/UE de 25 de outubro de 2012 relativa à eficiência energética. (2012). *Jornal Oficial da União Europeia* (pp. 1-56). União Europeia.

INE. (2015). *Estatísticas da Construção e Habitação-2014*. Lisboa-Portugal: Instituto Nacional de Estatística, I. P.

Portaria n.º 349-B/2013. *Diário da República*, 1.ª série — N.º 232 — 29 de novembro de 2013, (pp. 6624-(18) - 6624-(29)).

REGULAMENTO DELEGADO (UE) N.º 244/2012 DA COMISSÃO de 16 de janeiro de 2012. *Jornal Oficial da União Europeia* (pp. 18-36). Comissão Europeia.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013. *Diário da República*, 1.ª série — N.º 70 — 10 de abril de 2013 (pp. 2022-2091). Presidência do Conselho de Ministros.

# ANEXOS

## Anexo A – Variáveis de decisão do modelo de otimização

Tabela A.1 - Variáveis de decisão do modelo de otimização (1ª parte).

Conjunto de variáveis de decisão	Índice	Descrição
<b>Mecanismo de aquecimento de águas sanitárias</b>		
$x_j^A$	1	Caldeira a Gás Natural
	2	Caldeira a Biomassa
	3	Bomba de calor
	4	Esquentador Elétrico
	5	Termoacumulador
	6	Painel Solar Térmico: Sistema Circulação Forçada
	7	Painel Solar Térmico: Sistema Termossifão
<b>Mecanismo de aquecimento do Espaço</b>		
$x_j^E$	1	Caldeira a Gás Natural
	2	Ar Condicionado
	3	Aquecedor a óleo
	4	Lareira
<b>Mecanismo de arrefecimento de espaço</b>		
$u_j$	1	Ar Condicionado
<b>Material das janelas</b>		
$y_j$	1	Metal (sem TB), Vidros Duplos Ar (4mm + 6mm + 4mm)
	2	Metal (sem TB), Vidros Duplos Árgon (4mm+10mm+4mm)
	3	Metal (sem TB), Vidros Duplos Ar (6mm+6mm+6mm)
	4	Metal (sem TB), Vidros Duplos Árgon (6mm+10mm+6mm)
	5	Metal (sem TB), Vidros Duplos Ar com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)
	6	Metal (sem TB), Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)
	7	Metal (sem TB), Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (6mm+12mm+6mm)
	8	Metal (TB), Vidros Duplos Ar (4mm + 6mm + 4mm)
	9	Metal (TB), Vidros Duplos Árgon (4mm+10mm+4mm)
	10	Metal (TB), Vidros Duplos Ar (6mm+6mm+6mm)
	11	Metal (TB), Vidros Duplos Árgon (6mm+10mm+6mm)
	12	Metal (TB), Vidros Duplos Ar com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)
	13	Metal (TB), Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)
	14	Metal (TB), Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (6mm+12mm+6mm)
	15	PVC, Vidros Duplos Ar (4mm+6mm+4mm)
	16	PVC, Vidros Duplos Árgon (4mm+10mm+4mm)
	17	PVC, Vidros Duplos Ar (6mm+6mm+6mm)
	18	PVC, Vidros Duplos Árgon (6mm+10mm+6mm)
	19	PVC, Vidros Duplos Árgon (8mm+12mm+8mm)
	20	PVC, Vidros Duplos Ar com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)
	21	PVC, Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (4mm+6mm+6mm)
	22	PVC, Vidros Duplos Árgon com baixa emissividade (6mm+12mm+6mm)
	23	Janela original

Tabela A.2 - Variáveis de decisão do modelo de otimização (2ª parte).

Conjunto de variáveis de decisão	Índice	Descrição
<b>Mecanismo de sombreamento</b>		
$z_j$	1	Madeira - horizontal e fixo - 45°
	2	Madeira - horizontal e móvel - 45°
	3	Metal - <i>overhang</i> e fixo - 45°
	4	Metal - horizontal e fixo - 45°
	5	Metal - horizontal e móvel (120 mm) - 30°
	6	Metal - horizontal e móvel (145mm) - 45°
	7	Metal - horizontal e móvel (190mm) - 60°
	8	Metal - horizontal e móvel (250mm) - 30°
	9	Metal - horizontal e móvel (300mm) - 45°
	10	Metal - horizontal e móvel (400mm) - 60°
	11	Metal - vertical e fixo - 45°
	12	PVC - horizontal e fixo - 30°
	13	PVC - horizontal e móvel - 45°
	14	Sem mecanismo de sombreamento
<b>Material de isolamento térmico</b>		
$v_j$	1	Poliestireno Expandido (EPS) 0,03m
	2	Poliestireno Expandido (EPS) 0,04m
	3	Poliestireno Expandido (EPS) 0,05m
	4	Poliestireno Expandido (EPS) 0,06m
	5	Poliestireno Expandido (EPS) 0,08m
	6	Poliestireno Expandido (EPS) 0,1m
	7	Poliestireno Extrudido (XPS) 0,03m
	8	Poliestireno Extrudido (XPS) 0,04m
	9	Poliestireno Extrudido (XPS) 0,05m
	10	Poliestireno Extrudido (XPS) 0,06m
	11	Lã de Rocha 0,03m
	12	Lã de Rocha 0,04m
	13	Lã de Rocha 0,05m
	14	Lã de Rocha 0,06m
	15	Lã de Rocha 0,08m
	16	Lã de Rocha 0,1m
	17	Painel de Cortiça Expandida 0,03m
	18	Painel de Cortiça Expandida 0,04m
	19	Painel de Cortiça Expandida 0,05m
	20	Painel de Cortiça Expandida 0,06m
	21	Painel de Cortiça Expandida 0,08m
	22	Painel de Cortiça Expandida 0,1m
	23	Sem material de isolamento
<b>Produção de energia</b>		
$w_j$	1	Painel solar fotovoltaico

## Anexo B – Determinação do edifício de referência a partir da análise dos Censos

O presente anexo procura expõe as suposições consideradas e as equações que possibilitaram a determinação do edifício de referência a partir dos dados dos Censos 2011. Toda a informação aqui referida foi retirada e adaptada de Ximenes (2015) no seu caso de estudo aplicado à freguesia dos Olivais, Lisboa.

### Dados retirados dos Censos

Tabela B.1- Dados retirados dos Censos.

Descrição	Nomenclatura
Número de alojamentos com área inferior a $50m^2$	$Na_{A<50}$
Número de alojamentos com área entre $50m^2$ e $100m^2$	$Na_{50<A<100}$
Número de alojamentos com área entre $100m^2$ e $200m^2$	$Na_{100<A<200}$
Número de alojamentos com área superior a $200m^2$	$Na_{A>200}$
Número de alojamentos de residência habitual	$N_{rh}$
Número de edifícios com 1 ou 2 pisos	$Ne_{1<p<2}$
Número de edifícios com 3 ou 4 pisos	$Ne_{3<p<4}$
Número de edifícios com mais de 4 pisos	$Ne_{p>4}$
Número de edifícios exclusivamente residenciais	$N_{eer}$
Número de edifícios principalmente residenciais	$N_{epr}$
Número de edifícios clássicos isolados	$N_{ei}$
Número de edifícios clássicos geminados	$N_{eg}$
Número de edifícios clássicos em banda	$N_{eb}$

### Suposições

- Cada alojamento tem apenas um piso;
- Cada piso do edifício tem dois alojamentos ( $N_{app} = 2$ );
- Cada edifício tem um formato retangular com um rácio comprimento/largura igual a 2 ( $r = 2$ );
- A altura de cada piso é igual a 2,7 m ( $a_p = 2,7$  m);
- A fração ocupada por janelas nas paredes exteriores é de 0,3 ( $GAP = 0,3$ );
- A fachada do comprimento do edifício, a fachada mais longa, é sempre voltada para a rua, portanto casas geminadas ou em banda partilham as fachadas laterais, ou seja, da largura do edifício.

### Equações

- Número de pisos do edifício ( $N_{pisos.edif}$ ):

$$N_{pisos.edif} = \frac{1,5 \times Ne_{1<p<2} + 3,5 \times Ne_{3<p<4} + \overline{N_{p>4}} \times Ne_{p>4}}{Ne_{1<p<2} + Ne_{3<p<4} + Ne_{p>4}}$$

(B-1)

(B-2)

Onde,

$$\overline{Np_{p>4}} = \left( \frac{N_{rh} \times (Ne_{1<p<2} + Ne_{3<p<4} + Ne_{p>4})}{(N_{eer} + N_{epr}) \times N_{app}} - 1,5 \times Ne_{1<p<2} - 3,5 \times Ne_{3<p<4} \right) / Ne_{p>4}$$

Área do chão do alojamento ( $A_c$ ):

(B-3)

$$A_c = \frac{50 \times Na_{A<50} + 75 \times Na_{50<A<100} + 150 \times Na_{100<A<200} + 200 \times Na_{A>200}}{Na_{A<50} + Na_{50<A<100} + Na_{100<A<200} + Na_{A>200}}$$

- Área de telhado do edifício ( $A_t$ ):

$$A_t = A_c \times N_{app} \quad (B-4)$$

- Área de chão do edifício ( $A_{ce}$ ):

$$A_{ce} = A_c \times N_{app} \quad (B-5)$$

- Área de paredes exteriores ( $\overline{A_{pe}}$ ):

$$\overline{A_{pe}} = \frac{A_{pi} + A_{pg} + A_{pb}}{N_{ei} + N_{eg} + N_{eb}} \quad (B-6)$$

Onde,

$$A_{pi} = N_{ei} \times a_p \times N_{pisos.edif} \times 2 \times \sqrt{r \times A_{ce}} \times \left( 1 + \frac{1}{r} \right) \quad (B-7)$$

$$A_{pg} = N_{eg} \times a_p \times N_{pisos.edif} \times \sqrt{r \times A_{ce}} \times \left( 2 + \frac{1}{r} \right) \quad (B-8)$$

$$A_{pb} = N_{eb} \times a_p \times N_{pisos.edif} \times 2 \times \sqrt{r \times A_{ce}} + 4 \times \sqrt{r \times A_{ce}} \times \left( \frac{1}{r} \right) \quad (B-9)$$

- Área de janelas ( $A_j$ ):

$$A_j = \overline{A_{pe}} \times GAP \quad (B-10)$$

- Área de paredes exteriores, excluindo janelas ( $A_p$ ):

$$A_p = \overline{A_{pe}} - A_j \quad (B-11)$$



