

# **Estudo comparativo da utilização de diferentes fontes de energia para a climatização (aquecimento) de uma habitação isolada**

**DIOGO BERNARDO PEDRO**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Energia, Refrigeração e Climatização

Orientador:

Doutor Nuno Ricardo da Piedade Antunes Serra

Júri:

Presidente: Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Vogais:

Doutor Gonçalo Nuno Guerreiro de Jesus Silva

Doutor Nuno Ricardo da Piedade Antunes Serra

novembro de 2024



# **Estudo comparativo da utilização de diferentes fontes de energia para a climatização (aquecimento) de uma habitação isolada**

**DIOGO BERNARDO PEDRO**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Energia, Refrigeração e Climatização

Orientador:

Doutor Nuno Ricardo da Piedade Antunes Serra, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa

Vogais:

Doutor Gonçalo Nuno Guerreiro de Jesus Silva, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora

Doutor Nuno Ricardo da Piedade Antunes Serra, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa

novembro de 2024

# Agradecimentos

Primeiramente agradecer ao ISEL e a todas as pessoas intervenientes neste percurso, dentro desta instituição que me proporcionou, e permitiu, crescimento a nível académico, profissional e pessoal.

Ao Professor Nuno Serra, especialmente, sendo orientador da presente dissertação, me proporcionou ferramentas e conselhos e me encaminhou pelo trâmite a seguir. Sem o Sr. Professor Nuno Serra, não seria, de todo, o trabalho elaborado da mesma forma.

Às minhas entidades patronais, APIRAC/CENTERM, que durante este processo me permitiram tirar o tempo necessário para desenvolver o trabalho, e em especial aos colegas Eng.º João Rosa e Eng.º Luís Rosa pelos conselhos e disponibilidade demonstrados para o desenvolvimento desta tese.

Aos meus pais e irmã pelo apoio e suporte durante esta, e todas as etapas da minha vida. Sem eles, não seria possível concretizar este processo da forma que o foi. E à minha namorada pelo apoio e paciência necessários durante este percurso.



## Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

*Diogo Bernardo Rebelo*

Lisboa, 22 de novembro de 2024



# **Estudo comparativo da utilização de diferentes fontes de energia para a climatização (aquecimento) de uma habitação isolada**

## **Resumo**

A pobreza energética é um conceito que tem vindo a ganhar mais reconhecimento não só ao nível da União Europeia, como a nível mundial. Portugal encontra-se numa posição em que os fatores chave para a avaliação deste conceito mostram que o país, durante a estação de inverno, carece de soluções a preços acessíveis para a climatização das habitações e assim elevar os níveis de conforto térmico dos portugueses nas suas habitações. Tendo em conta a existência de uma panóplia considerável de sistemas e estratégias de aquecimento das habitações, baseadas em diferentes fontes de energia, como elétrica, biocombustíveis, e combustíveis de origem fóssil, e o aumento constante na preocupação a nível ambiental, importa avaliar o potencial, quer do ponto de vista dos custos de operação, quer do ponto de vista do impacto ambiental, da utilização de cada uma destes vetores energéticos no aquecimento de habitações em zonas desfavorecidas do país. O presente trabalho foca-se no estudo comparativo entre diferentes fontes de energia para a climatização (estação de aquecimento) de uma habitação isolada na região de Samora-Correia/Benavente avaliando qual a que oferece melhores resultados em termos energéticos, ambientais e financeiros, recorrendo para tal um software de simulação energética em edifícios. Neste âmbito, o presente estudo mostra que por vezes a solução ótima pode não ser evidente numa abordagem rápida, visto que os custos de investimento de alguns equipamentos são consideráveis, relativamente aos custos operacionais que são necessários para o aquecimento da habitação. Resulta, pois, evidente, do estudo que ora se apresenta, que a solução através da utilização de salamandra a pellets, apesar de onerosa na fase de instalação, revelou-se a mais atrativa quando se adicionaram os custos de operação e o impacto ambiental correspondente.

Palavras chave: Pobreza energética, Aquecimento, Eficiência energética

# **Comparative study of the use of different energy sources for air conditioning (heating) of a detached house**

## **Abstract**

Energy poverty is a concept that has been gaining more recognition not only at the European Union level, but also at a global level. In Portugal, the key factors for the evaluation of this concept indicate that there is a lack of cost-effective solutions for heating homes, that can increase the thermal comfort for its population, especially in winter. Taking into account the existence of a considerable range of home heating systems and strategies, based on different energy sources, such as electricity, biofuels, and fossil fuels, and the constant increase in environmental concerns, it is important to assess the potential, both from the point of view of operation costs, and from the point of view of the environmental impact, of the use of each of these energy vectors in creating comfortable built environments in disadvantaged regions of the country. This work focuses on the comparative study between different energy sources for the air conditioning (heating station) of an isolated house in the region of Samora-Correia/Benavente, evaluating which one offers the best results in energy, environmental and financial terms, using for this purpose, a Building Energy Simulation software. In this context, the present study shows that sometimes the optimal solution may not be evident in a quick approach, as the investment costs of some equipment are considerable, in relation to the operational costs that are necessary to heat the home. It is therefore evident, from the study presented, that the solution through the use of a pellet stove, despite being costly in the installation phase, proved to be the most attractive when the operating costs and the corresponding environmental impact were added.

Keywords: Energy poverty, Heating, Energy Efficiency



# Glossário

## Simbologia

$A$  – Área

$A_l$  – Área livre de abertura para ventilação

$A_s$  – Área da superfície perpendicular ao fluxo

$A_w$  – Área do vão envidraçado

$C$  – Constante da curva característica de condutas de ventilação natural

$c_p$  – Calor específico do ar a pressão constante

$e$  – Espessura do material

$E$  – Poder emissivo

$f_{eh}$  – Fator de eficiência hídrica

$g$  – Aceleração gravitacional

$H$  – Altura do edifício

$h$  – Coeficiente de transferência de calor por convecção

$h_c$  – Coeficiente de convecção

$h_{c,s}$  – Coeficiente de convecção em superfícies pouco rugosas

$h_{ce}$  – Coeficiente de convecção exterior na superfície

$h_f$  – Coeficiente de convecção forçada na superfície

$H_i$  – Diferença de cotas entre aberturas

$h_n$  – Coeficiente de convecção natural na superfície

$k$  – Condutividade térmica do material

$M_{AQS}$  – Consumo médio diário referência

$N_t$  – Necessidades nominais anuais de energia primária de referência

$N_{tc}$  – Necessidades nominais anuais de energia primária

$noc$  – Número de ocupantes convencionais do edifício em função da tipologia

$P$  – Perímetro da superfície

$Q$  – Caudal nominal da grelha

$Q_{AN, mecânico}$  – Caudal de ar novo por ventilação mecânica

$Q_{AN, natural}$  – Caudal de ar novo por ventilação natural

$Q_{ceiling}$  – Carga térmica devido à cobertura

$Q_{cond}$  – Quantidade de calor transferido por condução

$Q_{conv}$  – Quantidade de calor transferido por convecção

$q''_{conv}$  – Transferência de calor devido às trocas por convecção do ar exterior

$Q_{ext.infiltration}$  – Carga térmica devido a infiltrações exteriores

$Q_{glazing}$  – Carga térmica devido às superfícies envidraçadas

$Q_{ground}$  – Carga térmica devido ao piso

$q''_{ki}$  – Transferência de calor por condução para a parede

$q''_{ko}$  – Transferência de calor por condução para a parede

$q''_{LWR}$  – Transferência de calor devido à radiação de onda longa, causado pela envolvente

$q''_{LWS}$  – Transferência de calor devido a radiação de onda longa de equipamentos

$q''_{LWX}$  – Transferência de calor devido a trocas de radiação de onda longa entre superfícies, ou grupo de superfícies, numa zona

$Q_{partitions}$  – Carga térmica devido às divisões adjacentes

$Q_{sensible heating}$  – Carga térmica devido às paredes

$q''_{sol}$  – Fluxo de radiação solar transmitida, por sua vez absorvida pela superfície

$q''_{SW}$  – Transferência de calor devido à radiação de onda curta

$\dot{Q}_{transf}$  – Calor transferido entre os espaços considerados

$q_{v,abertura}$  – Caudal de ar através da abertura para ventilação

$q_{v,caixa de estore,baixa}$  - Caudal de ar pela caixa de estore com permeabilidade ao ar baixa

$q_{v,caixa de estore,elevada}$  - Caudal de ar pela caixa de estore com permeabilidade ao ar elevada

$q_{v,conduta}$  – Caudal de ar através da conduta

$q_{v,janela}$  – Caudal de ar devido à permeabilidade ao ar da janela

$Q_{walls}$  – Carga térmica devido às paredes

$q''_{\alpha sol}$  – Transferência de calor devido à radiação solar direta e difusa absorvidas (de onda curta) absorvidas

$R_f$  – Coeficiente de rugosidade da superfície

$R_j$  – Resistência térmica da camada j

$R_{Nt}$  – Rácio de classe energética em edifícios de habitação;

$R_p$  – Resistência térmica da parede

$R_{ph, mecânico}$  – Taxa de renovação de ar por ventilação mecânica

$R_{ph, natural}$  – Taxa de renovação de ar por ventilação natural

$R_{se}$  – Resistência térmica exterior j

$R_{si}$  – Resistência térmica interior

$t_{mecânica}$  – Horas de funcionamento diário da ventilação mecânica no período de ocupação

$t_{natural}$  – Horas de funcionamento diário da ventilação natural no período de ocupação

$t_{ocupação}$  – Horas de ocupação diária

$T_s$  – Temperatura da superfície sólida

$T_{sa}$  – Temperatura absoluta

$T_{\infty}$  – Temperatura do fluido

$U$  – Coeficiente Global de Transferência de Calor

$V_z$  – Velocidade do vento calculada no centro de massa da superfície

$W$  – Coeficiente de classe de permeabilidade ao ar

$W_f$  – Coeficiente da direção do vento (1 para superfícies a barlavento e 0.5 para superfícies a sotavento)

$x$  – Pressão de funcionamento da grelha autorregulável

$\theta_{ext,i}$  – Temperatura exterior média do mês mais frio da estação de aquecimento

$\theta_{ref,i}$  – Temperatura interior de referência na estação de aquecimento

$\varepsilon$  – Emissividade

$\lambda$  – Condutividade térmica

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzman

$\rho$  – Massa volúmica

$\Delta P$  – Diferença de pressão

$\Delta T$  – Diferença de temperatura entre duas superfícies

$\Delta x$  – Distância do corpo na direção

$\Sigma$  - Ângulo de inclinação da superfície.

### Acrónimos

AQS – Águas Quentes Sanitárias

ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*/Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado

B.C. – Bomba de calor

BPS – Building Performance Simulation/Simulação de Desempenho de Edifícios

CBAM – Carbon Border Adjustment Mechanism (Mecanismo de Ajustamento Carbónico Fronteiriço)

CE/EC – Comissão Europeia

CEF – Consumo de Energia Final

CEPI – *Composite Energy Poverty Index*/Índice Composto de Pobreza Energética

CFD - Mecânica de Fluídos Computacional

COP – Coeficiente de desempenho

CPLP – Comunidade dos Países de Língua Portuguesa

DEE – Desempenho Energético dos Edifícios

DGEG – Direção Geral da Energia e Geologia

DOE – *U.S. Department of Energy*/Departamento da Energia Americano

DOD – *U.S. Department of Defense*/Departamento da Defesa Americano

EM – Estados Membros

ENAAAC - Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas

EPAH - *Energy Poverty Advisory Hub*/ Centro de Aconselhamento para a Pobreza Energética

EPDB - *Energy Performance Buildings Directive*/Diretiva do Desempenho Energético dos Edifícios

EPOV - *Energy Poverty Observatory*/Observatório da Pobreza Energética

EPW – *Energy Plus Weather*

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

EU/EU – União Europeia

GEE – Gases com Efeito de Estufa

GPL – Gás Propano Liquefeito

HVAC/AVAC - *Heating, Ventilating and Air Conditioning*/Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*(Painel Intergovernamental sobre a Mudança do Clima)

ISO - *International Organization for Standardization*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NI - Indicador Energia Útil para Aquecimento Nominal

NIC – Indicador Energia Útil para Aquecimento Calculado

NT - Indicador Energia Primária Nominal

NTC – Indicador Energia Primária Calculado

NZEB/nZEB - *Net Zero Energy Buildings*/Edifícios de Energia Quase Nula

OECD - *The Organization for Economic Cooperation and Development*/Organização da Cooperação e Desenvolvimento Económico

PCI – Poder calorífico inferior

PED – *Positive Energy Buildings*/Edifícios de Energia Positiva

PNAC - Programa Nacional para as Alterações Climáticas

PNEC - Plano Nacional de Energia e Clima

QEPiC - Quadro Estratégico para a Política Climática

RECS - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

REH – Indicadores de Desempenho Energético

RPH - renovação do volume de ar por hora

SCE – Sistema de Certificação Energética

SCOP – Coeficiente de desempenho sazonal

SDM – Simulação Dinâmica Multizona

SNIERPA - Sistema Nacional de Inventário de Emissões por Fontes e Remoção por Sumidouros de Poluentes Atmosféricos

SPeM - Sistema Nacional para Políticas e Medidas

TARP - *Thermal Analysis Research Program*

TCMA - Taxa de Crescimento Média Anual

toe/tep – Toneladas Equivalente de Petróleo

# Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento e Âmbito do trabalho .....	1
1.1.1. Pobreza Energética – O Persistente Problema Endógeno do País .....	2
1.1.2. Grandes consumidores de energia.....	5
1.1.3. Objetivos União Europeia.....	10
1.1.4. Legislação nacional.....	13
1.1.5. Consumo de energia habitacional em Portugal .....	18
1.2. Revisão Bibliográfica .....	23
1.2.1. Pobreza energética .....	24
1.2.2. Simulação e eficiência energética em edifícios .....	27
1.3. Objetivos do trabalho .....	28
1.4. Estrutura do trabalho.....	29
2. Alguns conceitos fundamentais e caso de estudo .....	31
2.1. Energias para o aquecimento.....	31
2.2. Software de Simulação Energética – Modelação Numérica .....	37
2.3. Caso de estudo – Localização, envolvente e materiais .....	47
3. Modelação e simulação computacional.....	57
3.1. Caracterização do sistema .....	57
3.2. Situação inicial e curva de carga do sistema (Estação de aquecimento).....	63
3.3. Simulações energéticas para diferentes soluções.....	67
3.4. Análise e comparação de resultados.....	70
4. Conclusões e sugestões para trabalho futuro.....	83
4.1. Síntese final .....	83
4.2. Sugestões para trabalho futuro .....	86
Referências.....	89

# Índice de Figuras

Figura 1.1 Percentagem incapacidade para manter a casa adequadamente aquecida (2020;21;22) [1].....	2
Figura 1.2 Mapa geográfico com índices CEPI para a EU [4].....	5
Figura 1.3 Produção de Energia no mundo por região [5] .....	5
Figura 1.4 Utilização de diferentes fontes para produção de energia no mundo [5].....	6
Figura 1.5 Produção de energia para calor no mundo [5].....	6
Figura 1.6 Emissões de CO <sub>2</sub> no mundo, por região [5].....	7
Figura 1.7 Produção Energia Primária por combustível, UE1990-2022 [6] .....	7
Figura 1.8 Consumo de energia final por fonte de energia, UE1990-2022 [6].....	8
Figura 1.9 Consumo energia final por setor em [TJ], UE1990-2022 [6] .....	9
Figura 1.10 Consumo de energia final por setor [%], UE2022 [6] .....	9
Figura 1.11 Procura energética por fonte energética, UE1990-2021 [6] .....	10
Figura 1.12 Evolução do consumo de energia final por setor de atividade [22] .....	18
Figura 1.13 Evolução do consumo total de energia primária e distribuição total (%) 2021 [22].....	19
Figura 1.14 Distribuição do consumo total de energia final 2001-2021 [22].....	19
Figura 1.15 Consumo energia final, por tipo de energia, em habitações, UE, 2021 [23].....	20
Figura 1.16 Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de utilização - Portugal 2020 [24] .....	20
Figura 1.17 Consumo de energia no setor doméstico por tipo de fonte, Portugal 2020 [24] .....	21
Figura 1.18 Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de utilização e tipo de fonte de energia – Portugal, 2020 [24].....	21
Figura 1.19 Distribuição do consumo de energia no alojamento por fonte de energia e tipo de utilização – Portugal, 2020 [24] .....	22
Figura 2.1 Diferentes etapas do fluxo de energia [49].....	32
Figura 2.2 Diagrama de Sankey genérico [50].....	32
Figura 2.3 Diagrama de Sankey Portugal (a) Importações e produção (2022) [51].....	33
Figura 2.4 Diagrama de Sankey Portugal (b) Energia final para consumo, exportações, outros (2022) [51].....	33

Figura 2.5 Diagrama de Sankey Portugal (c) Energia diferentes setores (2022) [51] .....	34
Figura 2.6 Diagrama de Sankey Portugal (d) serviços, domésticos, agricultura, outros [51].....	34
Figura 2.7 Representação da hierarquia dos modelos no DesignBuilder [52] .....	37
Figura 2.8 Balanço térmico exterior EP [55].....	44
Figura 2.9 Balanço térmico interior EP [55].....	45
Figura 2.10 Esquema dos vários componentes da radiação solar incidente numa superfície [57].....	45
Figura 2.11 Representação geral de esquema de sombreamento EP [55].....	47
Figura 2.12 Ilustração da posição solar [55].....	47
Figura 2.13 Planta da habitação em estudo .....	48
Figura 2.14 Alçado principal da habitação em estudo .....	48
Figura 2.15 Dados meteorológicos para a localização da habitação em estudo retiradas do software de cálculo da DGEG "SCE.CLIMA" [58] .....	49
Figura 2.16 Temperaturas mensais: média, mínimo e máximos absolutos [°C] [58] .....	49
Figura 2.17 Irradiação solar mensal, média diária [kWh/m <sup>2</sup> ] [58].....	50
Figura 2.18 Humidade relativa média mensal [%][58] .....	50
Figura 2.19 Temperaturas (T), Irradiação solar global (G) e difusa (D), Humidade relativa (U) e intensidade do vento (v) [58].....	50
Figura 3.1 Separador "location", DesignBuilder [40].....	57
Figura 3.2 Vistas 3D do modelo da habitação em estudo [40] .....	58
Figura 3.3 Estrutura hierarquizada de dados do lado esquerdo e a representação gráfica do lado direito [40] .....	58
Figura 3.4 Menu "Activity" para a cozinha [40] .....	59
Figura 3.5 Perfis horários para as diferentes divisões (dias de semana) [65].....	60
Figura 3.6 Diferentes elementos de construção DesignBuilder [52] .....	60
Figura 3.7 Coeficiente de transferência de calor calculado para a parede exterior DesignBuilder [40] .....	61
Figura 3.8 Convecção e permeabilidade para o modelo da habitação no DesignBuilder [40].....	62
Figura 3.9 Superfície envidraçada simples 3mm, cozinha DesignBuilder [40].....	62

Figura 3.10 Iluminação WC DesignBuilder [40].....	62
Figura 3.11 Temperatura exterior e interior para as diferentes zonas, situação inicial [40]	63
Figura 3.12 Radiação direta e difusa (dia 16 de janeiro) [39] .....	64
Figura 3.13 Curva de carga para o mês de janeiro, situação inicial set-points 18°C .....	64
Figura 3.14 "Heating Design" ganhos internos e potência aquecimento situação inicial com set-points de 18° [39] .....	65
Figura 3.15 "Heating Design" ganhos internos e potência aquecimento situação inicial com set-points de 16° [40] .....	66
Figura 3.16 Curva de carga para o mês de janeiro, situação inicial set-points 16°C .....	67
Figura 3.17 Custos operacionais para as diferentes soluções (estação de aquecimento).	71
Figura 3.18 Curva de carga para o mês de janeiro, reabilitação e set-points 16°C .....	80

## Índice de Tabelas

Tabela 1.1 Alguns valores calculados CEPI para vários países da União Europeia [4].....	4
Tabela 2.1 Fatores de conversão de energia final para energia primária [21] .....	35
Tabela 2.2 Fatores de conversão de energia primária para emissões de CO <sub>2</sub> [21].....	36
Tabela 2.3 Intervalos de valor de R <sub>Nt</sub> para edifícios de habitação [21].....	36
Tabela 2.4 Identificação das diferentes zonas da habitação .....	48
Tabela 2.5 Coeficiente de transferência de calor parede exterior 25cm (Laboratório Nacional de Engenharia Civil [62]) .....	52
Tabela 2.6 Coeficiente de transferência de calor parede interior 15cm (Laboratório Nacional de Engenharia Civil [62]) .....	52
Tabela 2.7 Coeficiente de transferência de calor pavimento (Laboratório Nacional de Engenharia Civil [62]) .....	53
Tabela 2.8 Coeficiente de transferência de calor cobertura exterior (Laboratório Nacional de Engenharia Civil [62]) .....	53
Tabela 3.1 Potência Aquecimento e ganhos/perdas em cada zona da habitação, em kW [40].....	66
Tabela 3.2 Consumo, custos operação, energia primária e emissões CO <sub>2</sub> (solução eletricidade 1) para o mês de janeiro e para a estação de aquecimento .....	68
Tabela 3.3 Consumo, custos operação, energia primária e emissões CO <sub>2</sub> (solução eletricidade 2) para o mês de janeiro e para a estação de aquecimento .....	69
Tabela 3.4 Consumo, custos operação, energia primária e emissões CO <sub>2</sub> (solução biomassa 3) para o mês de janeiro e para a estação de aquecimento .....	69
Tabela 3.5 Consumo, custos operação, energia primária e emissões CO <sub>2</sub> (solução GPL 4) para o mês de janeiro e para a estação de aquecimento .....	70
Tabela 3.6 Resultados simulações para as diferentes soluções (estação aquecimento) .....	71
Tabela 3.7 Payback time (anos) diferentes soluções comparativamente à solução existente (lareira) sala .....	73
Tabela 3.8 Payback time (anos) diferentes soluções comparativamente à solução existente (lareira) total .....	74
Tabela 3.9 Payback time (anos) diferentes soluções comparativamente à solução existente com adição de um permutador de calor a água.....	75

Tabela 3.10 Estudo económico (ano 1 até ao ano 8).....	76
Tabela 3.11 Estudo económico (ano 9 até ano 15).....	76
Tabela 3.12 Estudo económico (ano 26 até ano 30).....	77
Tabela 3.13 Consumos e custos obtidos para as soluções 2 e 3, considerando vidros duplos e isolamento térmico de 40 mm nas paredes exteriores.....	78
Tabela 3.14 Comparação do payback simples para as soluções 2 e 3 considerando os custos de investimento para reabilitação da habitação.....	78
Tabela 3.15 Estudo a 15 anos para os custos acumulados para as soluções estudadas (ano 1 - ano 8).....	79
Tabela 3.16 Estudo a 15 anos para os custos acumulados para as soluções estudadas (ano 8 - ano 15).....	79

# 1.Introdução

## 1.1. Enquadramento e Âmbito do trabalho

Várias são as fontes de energia térmica utilizadas no setor dos edifícios, quer seja na construção de ambientes, no aquecimento de águas sanitárias ou outros. E como expectável, as formas de energia utilizadas podem diferenciar no tipo de fonte para aquecimento, resultando em diferenças nas emissões de poluentes atmosféricos e nos consumos de energia primária. Portugal encontra-se num clima mediterrânico, em que o seu ambiente é maioritariamente quente durante o período de verão, atingindo-se, no inverno, temperaturas perto, e abaixo dos 0°C. Pese embora ser Portugal um país de clima tendencialmente temperado, em muitas regiões os invernos podem ser muito frios, o que, aliado à pobreza energética endógena dos seus habitantes, faz com que os utilizadores optem por soluções temporárias e baratas para se aquecerem em períodos mais frios. Muito do desconforto térmico reportado se deve à fraca implementação de medidas de construção habitacional, o que redundava em edifícios com baixas eficiências energéticas. O atrás descrito resulta maioritariamente da tendência vigente para construir barato em detrimento da construção em qualidade e em respeito pelas soluções mais eficientes. Nem sempre a razão preço qualidade é o fator mais denso na altura da compra ou da construção. Ultimamente, através de incentivos por parte do Estado, já vai existindo menos resistência por parte dos utilizadores domésticos na adoção de estratégias de compra mais focadas na utilização racional de energia, pois é sabido que as medidas de eficiência tendem a ter um curto-médio prazo de retorno de capital, o que acaba por influenciar na tomada de decisão.

Assim, aliado às boas implementações de medidas de eficiência energética em habitações, o seu estudo é fundamental para assim otimizar a utilização dos materiais e recursos, de forma a inverter a tendência vigente anteriormente descrita, não só no setor doméstico, mas em todo o setor dos edifícios.

### 1.1.1. Pobreza Energética – O Persistente Problema Endógeno do País

A energia está presente em todo o nosso quotidiano, e conseqüentemente existem necessidades energéticas, a nível de aquecimento, arrefecimento, iluminação, entre outros, nas nossas habitações para garantir um conforto mínimo e ajudar a garantir a nossa saúde e bem-estar. A pobreza energética ocorre quando um agregado familiar tem de reduzir o consumo de energia, por limitações financeiras, a um nível que tenha um impacto negativo na saúde e no bem-estar dos habitantes. É impulsionado principalmente por três causas subjacentes [1]:

- Uma elevada proporção dos gastos com energia nas despesas familiares;
- Rendas elevadas;
- Baixo desempenho energético de edifícios e equipamentos.

Devido à sua natureza privada, uma vez que afeta principalmente os agregados familiares, e à sua complexidade, a pobreza energética continua a ser um grande desafio a ser abordado na UE. A crise da COVID-19, seguida do aumento dos preços da energia e da invasão russa à Ucrânia em Fevereiro de 2022, agravaram uma situação já difícil para muitos cidadãos da UE [1].

8%	6,9%	9,3%
em 2020	em 2021	em 2022

Figura 1.1 Percentagem incapacidade para manter a casa adequadamente aquecida (2020;21;22) [1]

Em 2022, os elevados preços da energia, juntamente com a crise do custo de vida, fizeram com que cerca de 9,3% dos europeus não conseguissem manter as suas casas adequadamente aquecidas, o que contrasta com os 6,9% em 2021. (Figura 1.1)

“A mensagem é clara: a pobreza energética deve ser combatida abordando as suas causas profundas através de medidas estruturais e específicas e, em particular, através da eficiência energética.” [1]

Face às conseqüências das alterações climáticas e à urgência da transição energética, importa adotar políticas que não agravem injustiças e, simultaneamente, combatam a pobreza energética de Portugal, de forma sustentável.

A pobreza energética começou por ser entendida como uma condição em que as famílias não conseguem aquecer as suas casas adequadamente. No Reino Unido, onde este problema ganhou primeiramente reconhecimento político, os agregados familiares

têm sido considerados como estando em pobreza energética quando precisam de gastar mais de 10% do seu rendimento em energia de modo a assegurar um nível adequado de aquecimento. No entanto, investigações entretanto realizadas têm demonstrado a necessidade de se adotar uma definição mais abrangente, sendo bastante consensual entre a comunidade científica que a pobreza energética consiste na incapacidade de obter um nível social e materialmente necessário de serviços energéticos domésticos [2]. Neste sentido, reconhece-se a importância de incluir todos os serviços energéticos cuja falta cause desconforto ou esteja associada a dificuldades – e não só a capacidade de manter a casa aquecida, nem apenas o que se entenda serem necessidades básicas. Assim, não pode haver um indicador único que permita medir a pobreza energética, esta deve ser identificada através da observação de diversos fatores, entre os quais [3]:

- Qualidade e eficiência energética da habitação;
- Infraestruturas e equipamentos disponíveis;
- Práticas sociais;
- Eficiência dos equipamentos domésticos;
- Rendimentos dos cidadãos;
- Preços da energia;

A pobreza energética tem detalhes que a distinguem de pobreza monetária. Embora muitas das famílias com rendimentos inferiores ao limiar de pobreza estejam em situações de pobreza energética, esta também inclui os indivíduos que, para evitar custos elevados, adotam práticas de restrição à utilização de energia que não lhes permitem ter as suas casas adequadamente aquecidas ou arrefecidas. É assim fundamental identificar os diversos fatores que estão na origem do problema, em cada país e região, para que seja possível obter soluções adequadas [3].

Dado que a pobreza energética é um problema complexo, torna-se necessária a elaboração de um índice composto que incorpore várias dimensões das suas principais causas e consequências. Foi elaborado um rótulo atribuído a este índice, por Kashour e Jaber [4], denominado Índice Composto de Pobreza Energética (CEPI) [4].

As variáveis selecionadas para calcular o índice composto serão, primeiramente, as três variáveis consensuais: incapacidade de manter o aquecimento doméstico adequado, atrasos nas contas de serviços públicos e residências com infiltrações, humidade e podridão (variáveis extraídas do Eurostat). Muitos investigadores utilizaram

estas variáveis para medir a pobreza energética, visto fornecerem uma imagem abrangente da situação das famílias. As outras três variáveis são inspiradas noutros dos principais fatores dominantes da pobreza energética descritos na literatura: a pontuação de eficiência energética doméstica, o preço eletricidade doméstica e o rendimento médio anual do agregado familiar [4].

A Tabela 1.1 elenca os valores calculados, recorrendo ao método atrás referido. Salienta-se, neste âmbito, a 24<sup>a</sup> posição de Portugal a que corresponde um Índice Composto de Pobreza Energética (CEPI) de 0.57.

*Tabela 1.1 Alguns valores calculados CEPI para vários países da União Europeia [4]*

<b>País</b>	<b>CEPI</b>	<b>CEPI posições</b>
<b>Finlândia</b>	0.141	1
<b>Polónia</b>	0.44	17
<b>Malta</b>	0.297	8
<b>Holanda</b>	0.142	2
<b>França</b>	0.273	6
<b>Croácia</b>	0.492	19
<b>Itália</b>	0.484	18
<b>Lituânia</b>	0.502	21
<b>Portugal</b>	0.572	24
<b>Grécia</b>	0.655	27
<b>Bulgária</b>	0.642	26
<b>Chipre</b>	0.629	25
<b>Luxemburgo</b>	0.21	3
<b>Espanha</b>	0.493	20
<b>Irlanda</b>	0.278	7

Entre os Estados-Membros da UE, o Chipre, a Bulgária, a Grécia e Portugal apresentaram os valores CEPI mais elevados, 0,629, 0,642, 0,655, 0,572 respetivamente, indicando níveis relativamente mais elevados de pobreza energética. A Grécia possui a maior percentagem da população enfrentando atrasos nas contas de serviços públicos, a Bulgária teve a maior percentagem de a população incapaz de manter as suas casas adequadamente aquecidas, e Chipre tinha a maior percentagem de agregados familiares que viviam em habitações com infiltrações e humidade. Por outro lado, os estados com menor CEPI apresentam índices de: 0,210 (Luxemburgo), 0,142 (Holanda) e 0,141 (Finlândia) [4].

O mapa da figura seguinte mostra que a pobreza energética está predominantemente concentrada nos estados do Sul e Este, sendo que no Norte da Europa juntamente com os estados mais ocidentais, com a exceção de Portugal e Espanha, apresentam incidências comparativamente mais baixas (ver Figura 1.2)

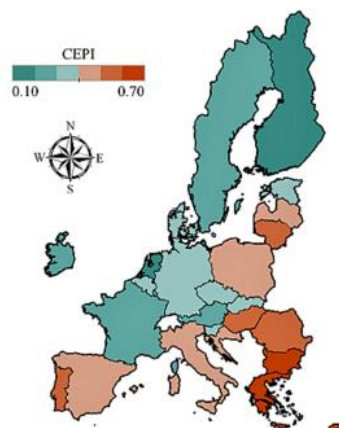


Figura 1.2 Mapa geográfico com índices CEPI para a EU [4]

Os objetivos intrínsecos à redução dos índices de pobreza energética estão diretamente ligados aos consumos de energia, nomeadamente à parcela relacionada com o consumo doméstico. O setor dos edifícios é dos mais que mais contabiliza em consumos de energia final, a nível mundial e nacional, sendo por isso um objeto que merece a maior atenção, uma vez que estes tendem a aumentar. Da mesma forma, o aumento do consumo de energia primária e as consequentes emissões de poluentes atmosféricos tem originado preocupações a nível mundial que devem ser estudadas, de forma a limitar esta tendência através de medidas que visem a eficiência energética, não apenas nos edifícios, como em todos os setores inerentes aos consumos de energia.

### 1.1.2. Grandes consumidores de energia

A energia contribui para o bom funcionamento de todos os sectores económicos, desde o comércio e a indústria até à agricultura. A energia tornou-se um bem essencial para as sociedades, sendo que a produção da mesma, em 2021, teve valores mais elevados na Ásia (países OECD e não-OECD, excluindo a China) liderando com 3975 Mtoe seguido da China (2214Mtoe) e os Estados Unidos (2214 Mtoe) (Figura 1.3).

**Mtoe**

	2000	2010	2015	2019	2020	2021
EU27_2020	679	697	654	610	564	588
China	1124	2235	2504	2720	2798	2983
United States	1666	1723	2019	2306	2157	2214
Middle East	1328	1632	1896	1978	1882	1911
Asia*	2586	3451	3767	4060	3878	3975
Russian Federation	978	1280	1334	1530	1430	1530
Africa	881	1161	1104	1177	1076	1119
Rest of the World	762	601	450	373	405	354
World	10004	12781	13728	14754	14189	14673

Figura 1.3 Produção de Energia no mundo por região [5]

Relativamente à utilização de fontes de energia, ela é liderada pelo petróleo e seus derivados (29.2%), seguido de combustíveis sólidos (27.3%) e pelo gás natural (23.8%), sendo que as energias renováveis se encontram com 14.3%, valor que tem vindo a aumentar ao longo dos anos como se verifica na Figura 1.4.

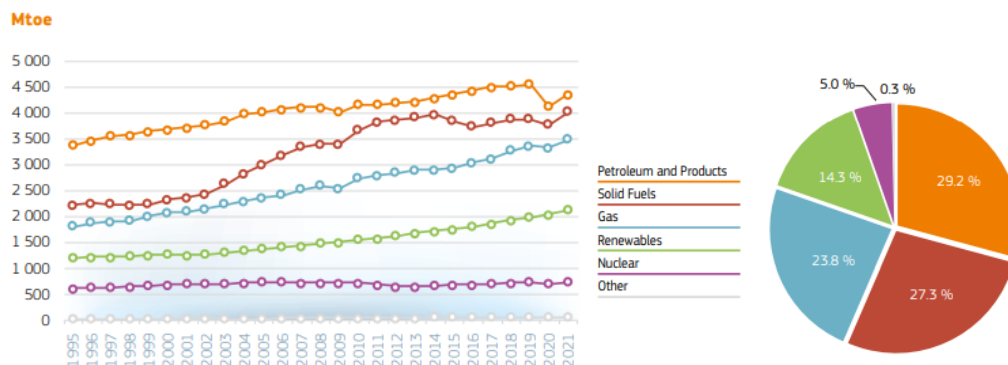


Figura 1.4 Utilização de diferentes fontes para produção de energia no mundo [5]

No que toca a produção de energia para calor, os combustíveis sólidos e o gás, que se encontra como segunda fonte de maior utilização, têm uma grande predominância, seguida por biocombustíveis e resíduos, sendo estes últimos caracterizados como energias renováveis, como se pode verificar na Figura 1.5. A UE ainda depende fortemente dos combustíveis fósseis como fonte energética e enfrenta uma série de desafios para garantir um abastecimento de energia acessível, fiável e sustentável [5].

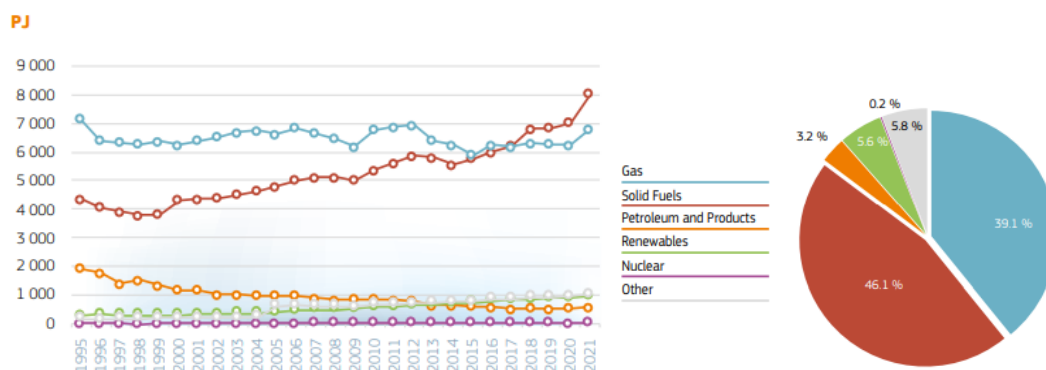


Figura 1.5 Produção de energia para calor no mundo [5]

Relativamente às emissões de CO<sub>2</sub>, os maiores produtores são nitidamente a China seguida da Ásia (países OECD e não-OECD, excluindo a China), com 10 683 MT CO<sub>2</sub> e 8 832 MT CO<sub>2</sub>, respetivamente. As emissões de CO<sub>2</sub> da UE encontram-se cerca de 40% abaixo das emissões dos Estados Unidos, como representado na Figura 1.6. Também é possível verificar um ligeiro decréscimo, ao longo do tempo, nas emissões de CO<sub>2</sub> na UE, relativamente aos níveis de 2005.

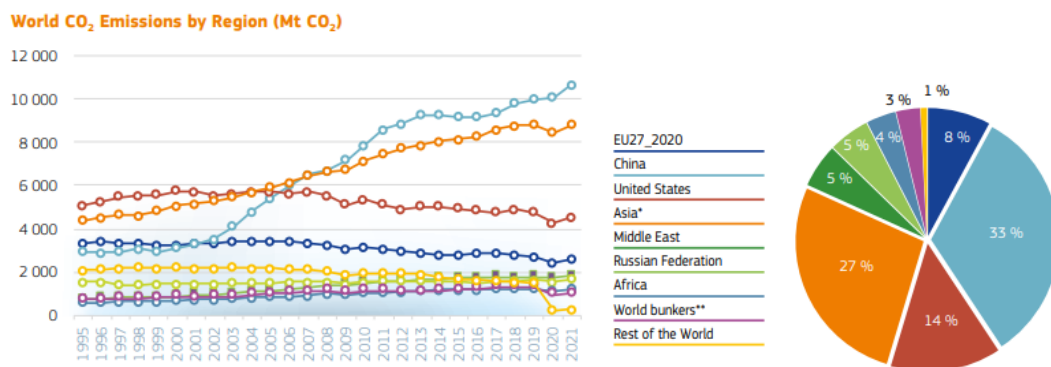


Figura 1.6 Emissões de CO<sub>2</sub> no mundo, por região [5]

Na última década (período de 2012-2022), a tendência na produção de energia primária foi decrescendo para combustíveis fósseis sólidos, petróleo, gás natural e energia nuclear. A produção de gás natural viu o declínio mais acentuado (-64,9%), seguido por combustíveis fósseis sólidos e petróleo e produtos petrolíferos (com uma queda de 38,7% e 38,0%, respetivamente). A produção de energias renováveis seguiu uma tendência positiva clara no mesmo período, com um aumento de 32,6% [6]. (ver Figura 1.7)

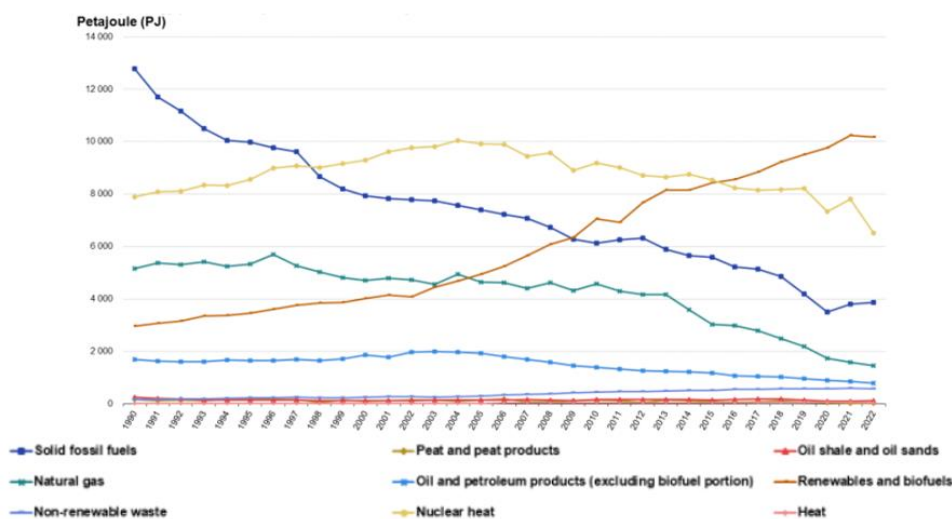


Figura 1.7 Produção Energia Primária por combustível, UE1990-2022 [6]

A produção de energia primária na EU, em 2022, correspondeu a 23 566 petajoules (PJ), menos 5,9% do que em 2021, tendo aumentado para combustíveis fósseis sólidos, mas diminuiu para petróleo, gás natural e energias renováveis e biocombustíveis relativamente a 2021. As energias renováveis contaram com a maior parte na produção de energia primária na UE em 2021 (43,2%), seguidas pelo nuclear (27,6%), combustíveis fósseis sólidos (16,4%), gás natural (6,2%), petróleo e produtos petrolíferos (3,3%) e resíduos não renováveis (2,4%). (Figura 1.7)

O consumo de energia final na UE em 2022 foi de 37 771 PJ, 3,9% inferior ao ano de 2021. Desde 1994, o consumo de energia final foi aumentando lentamente, atingindo o seu valor máximo (41 447 PJ) no final de 2006. A partir desse ano, o consumo de energia final foi, globalmente, diminuindo, tendo uma redução de 8.9%, em 2022, comparativamente ao valor máximo atingido [7]. (Figura 1.8)

Entre 1990 e 2022, a participação total de combustíveis fósseis no consumo de energia final caiu significativamente de 9,6% para 1,8%. Contrariamente, as contribuições derivadas das fontes de energia renovável aumentaram a sua parcela no consumo de energia final desde 1990 (4,3%) até 2022 (12,2%). (ver Figura 1.8)

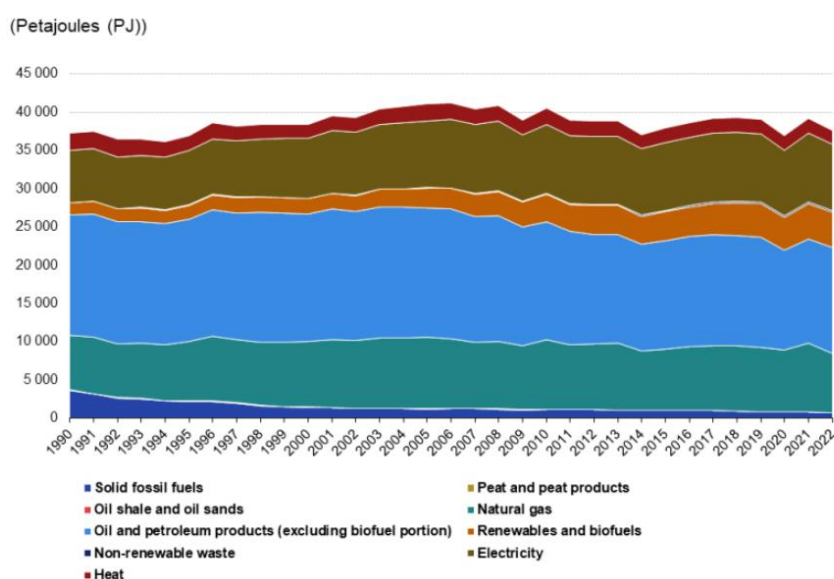


Figura 1.8 Consumo de energia final por fonte de energia, UE1990-2022 [6]

Desde o período de 2006-2007, o consumo de energia final no setor industrial foi globalmente diminuindo até 2022 (17,5%). O setor dos transportes registou um decréscimo de 4.1% enquanto os setores dos serviços e doméstico, tiveram uma redução no consumo de energia final de 3,9% e 2,7%, respetivamente (Figura 1.9)

Em 2022, os setores dominantes no consumo de energia final foram os transportes (31%), doméstico (26.9%) e indústria (25%). (Figura 1.10)

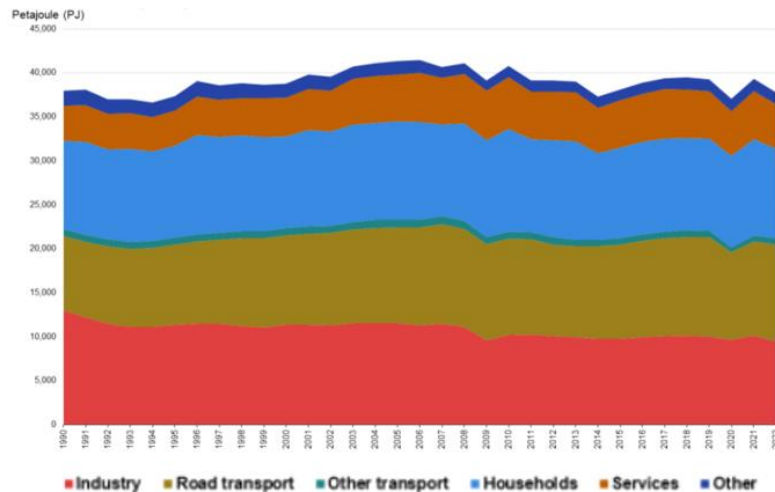


Figura 1.9 Consumo energia final por setor em [TJ], UE1990-2022 [6]

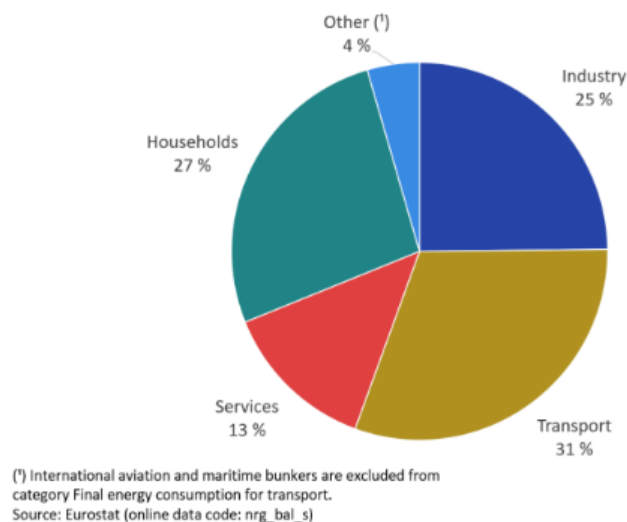


Figura 1.10 Consumo de energia final por setor [%], UE2022 [6]

Repare-se, que na UE, o setor doméstico é o segundo que contabiliza mais consumo de energia final, demonstrando a importância de atuar no consumo racional de energia em habitações e por consequência limitar as emissões de poluentes atmosféricos. Partindo das fontes energéticas que mais favorecem as necessidades mundiais na vertente ambiental, também se torna de grande relevância a utilização de equipamentos com maiores eficiências, limitando por efeito a produção de energia primária, atuando da mesma forma na vertente económica, tanto dos países como a nível particular.

### Dependência energética

A utilização interna de energia representa a quantidade de energia necessária para satisfazer as necessidades energéticas de um país ou região. O rácio entre as importações líquidas de energia e a utilização interna de energia, indica a capacidade

de um país ou região para satisfazer todas as suas necessidades energéticas. Essa relação é chamada de dependência energética. Por outras palavras, mostra até que ponto um país ou uma região depende das importações de energia [6].

O gráfico da Figura 1.11 mostra essa relação tendo em conta o tipo de fonte energética, e a coluna de cor mais clara representa a energia importada líquida (importações menos exportações) sendo que a coluna mais escura representa a energia produzida na UE. O rácio entre o topo da coluna mais clara e o topo da mais escura, representa a dependência energética, por tipo de fonte de energia.

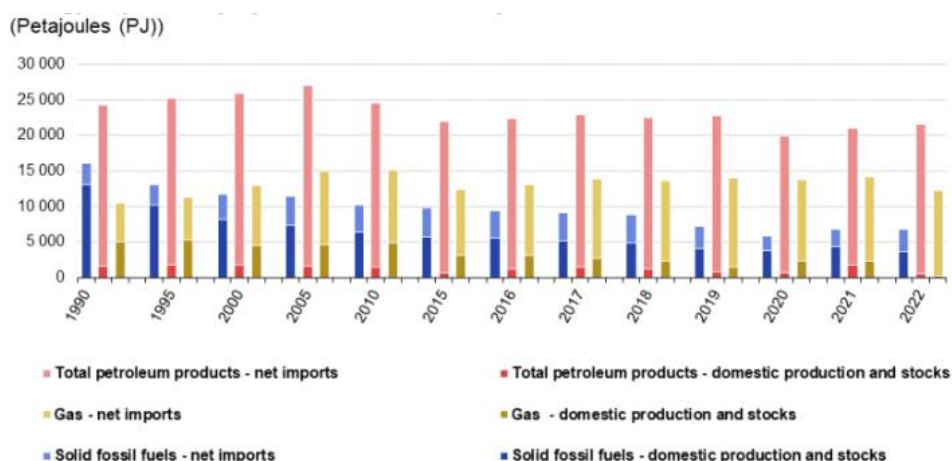


Figura 1.11 Procura energética por fonte energética, UE1990-2021 [6]

Em 2022, a procura energética da UE foi mais elevada no que diz respeito ao petróleo e aos produtos petrolíferos, atingindo 21 532 PJ, dos quais 97,7% foram importados. Para o gás natural, a demanda total em 2022 correspondeu a uma parcela de 97,6% de importações. Globalmente, a tendência a longo prazo desde 1990 aponta para um pequeno aumento na dependência das importações. Em 1990, 50% de todos os combustíveis consumidos eram importados, e em 2022 aumentou para 62,5%. (Figura 1.11)

### 1.1.3. Objetivos União Europeia

Existe um progressivo debate, pelos governos de todo o mundo, sobre como prevenir as alterações climáticas e os seus efeitos negativos. A nível da União Europeia vários documentos estratégicos, ou iniciativas intergovernamentais (por exemplo, cimeiras climáticas) têm sido concretizadas. Os estados individuais também comprometem os seus próprios esforços e ações internas destinadas a combater a influência do risco climático, são disso exemplo, sistemas tributários baseados em

impostos ambientais, o princípio do poluidor-pagador, sistemas de subsídios e apoio à transformação verde [7].

Para limitar o aquecimento global em 1,5°C - o limite considerado seguro pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) - é essencial atingir uma neutralidade em termos de carbono até 2050. Este objetivo foi também definido no Acordo de Paris [8], assinado por 195 países.

Em dezembro de 2019, a Comissão Europeia apresentou o Pacto Ecológico Europeu [9] que pretende assegurar que as políticas da UE nos domínios do clima, da energia, dos transportes e da tributação sejam adequadas para permitir uma redução das emissões líquidas de gases com efeito de estufa de, pelo menos, 55 % até 2030 em comparação com os níveis de 1990, com o objetivo de alcançar a neutralidade climática até 2050. O pacto pretende igualmente proteger, conservar e reforçar o capital natural da UE e proteger a saúde e o bem-estar dos cidadãos contra riscos e impactos relacionados com o ambiente. Ao mesmo tempo, esta transição deve ser equitativa e inclusiva. Deve dar prioridade às pessoas e prestar atenção às regiões, às indústrias e aos trabalhadores que enfrentarão os maiores desafios [9].

Os objetivos do Pacto Ecológico Europeu [9] estão na base da estratégia energética e ambiental da UE, e definem as dimensões da política energética da EU, entre as quais aumentar a ambição da EU em matéria de clima para 2030 e 2050, fornecer energia limpa, segura e a preços acessíveis, construir e renovar de forma eficiente em termos de energia e recursos, entre outros.

Os desafios globais das alterações climáticas e da degradação ambiental exigem uma resposta global. A UE continuará a promover e a aplicar políticas ambiciosas em matéria de ambiente, clima e energia em todo o mundo. Desenvolverá uma «diplomacia do pacto ecológico» mais forte, centrada em convencer e apoiar os outros para que assumam a respetiva quota-parte na promoção do desenvolvimento mais sustentável. Ao estabelecer um exemplo credível, acompanhado de diplomacia, da política comercial, do apoio ao desenvolvimento e de outras políticas externas, a UE pode ser um defensor eficaz [9].

No plano internacional, a UE desempenha um papel importante, colaborando com outros países, regiões e organizações internacionais para resolver os problemas energéticos e garantir um mercado da energia fiável e competitivo na Europa.

O pacote de legislação conhecido como "Objetivo 55" (ou "Fit for 55") [10] inclui regras relativas a: comércio de licenças de emissões, metas nacionais de redução de

emissões, emissões dos transportes, entre outros. Outra forma de reduzir as emissões de carbono e atingir a sua neutralidade consiste na compensação de emissões de um setor reduzindo-as noutro setor. Isto pode ser alcançado através do investimento nas energias renováveis, na eficiência energética ou noutras tecnologias limpas e com baixas emissões. O regime de comércio de licenças de emissão da UE é um exemplo de sistema de compensação de carbono [10].

### **Reduzir as emissões na produção de energia**

A queima de combustíveis fósseis é responsável por mais de três quartos das emissões de gases com efeito de estufa da UE. Abrange a produção de eletricidade, o aquecimento de espaços com ocupação humana e os transportes, ou seja, parte significativa dos pilares essenciais ao nosso quotidiano. O consumo racional de energia e o desenvolvimento de fontes de energia mais limpas são fundamentais para alcançar os objetivos climáticos da UE e resolver a dependência da UE das importações provenientes de países terceiros [11].

### **Consumir menos energia**

Em julho de 2023, o Parlamento aprovou novas regras para impulsionar a poupança de energia. Os Estados-Membros da UE devem assegurar coletivamente uma redução do consumo de energia de, pelo menos, 11,7% a nível da UE até 2030 (em comparação com as projeções de 2020 para o consumo de energia em 2030). Até ao final de 2030, cada país deverá também registar uma poupança anual de energia de 1,5% (em média). O Parlamento está a trabalhar em regras para o desempenho energético dos edifícios com o objetivo de atingir um parque imobiliário com zero emissões até 2050 [11].

### **Aumentar a utilização de energias renováveis**

O desenvolvimento de fontes de energia limpas como alternativas aos combustíveis fósseis também ajudará a UE a reduzir as emissões. Atualmente, mais de 20% da energia consumida na UE provém de fontes de energia renováveis. A Comissão Europeia fez com que as licenças para o funcionamento de centrais de energia renovável sejam emitidas mais rapidamente, incluindo parques fotovoltaicos e sistemas aerogeradores, assim como estão a incentivar o reforço na produção de hidrogénio renovável e da instalação de sistemas de geração offshore eólicos ou baseados na energia das ondas. O financiamento da UE para projetos de infraestruturas de gás natural está a ser progressivamente eliminado e o dinheiro redirecionado para a construção de infraestruturas de produção de hidrogénio ou de geração offshore [11].

## **Fixação de preços de carbono nos produtos importados**

Um mecanismo de ajustamento do carbono nas fronteiras permitiria incentivar as indústrias da UE e de países terceiros à descarbonização, ao aplicar um preço do carbono às importações de determinados bens se estes provierem de países menos ambiciosos em termos climáticos. Pretende-se com este mecanismo evitar a fuga de carbono, isto é, as indústrias da UE deslocarem a sua produção para países com regras menos rigorosas em matéria de redução das emissões de gases com efeito de estufa.

Como parte do pacote “Objetivo 55” [10], a UE também criou o Mecanismo de Ajustamento Carbónico Fronteiriço (CBAM), aplicando uma taxa de carbono sobre as importações de certos produtos provenientes de fora da UE. Vai abranger produtos de indústrias com utilização intensiva de energia em determinados setores. Os importadores terão de pagar qualquer diferença entre o preço do carbono pago no país de produção e o preço das licenças de carbono no âmbito do regime de comércio de licenças de emissão da EU [9].

## **Reduzir os gases com efeito de estufa para além do CO<sub>2</sub>**

Para atenuar o aquecimento global, a UE está também a envidar esforços para limitar a libertação de outros gases com efeito de estufa, como o metano, os gases fluorados, gases libertados pela queima de combustíveis fósseis, e as substâncias que empobrecem a camada de ozono. Embora estejam presentes na atmosfera em volumes menores do que o CO<sub>2</sub>, podem ter um efeito de aquecimento significativo e são também abrangidos por esta estratégia [11].

### **1.1.4. Legislação nacional**

A resposta política e institucional nesta matéria foi atualizada e desenvolvida, encontrando-se espelhada nas propostas relativas ao Quadro Estratégico para a Política Climática (QEPiC), que inclui, nas vertentes de mitigação e adaptação às alterações climáticas, os principais instrumentos de política nacional, dos quais se destacam o Programa Nacional para as Alterações Climáticas 2020/2030 (PNAC 2020/2030 que já foi substituído pelo PNEC2030, em 2021) e a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (EN AAC 2020). Para a monitorização da implementação da política climática e das ações desenvolvidas estão incluídos no QEPiC o Sistema Nacional para Políticas e Medidas (SPeM) e o Sistema Nacional de Inventário de Emissões por Fontes e Remoção por Sumidouros de Poluentes

Atmosféricos (SNIERPA), assim como o sistema de reporte previsto no âmbito da ENAAC 2020 [12].

## **Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas 2020 – ENAAC 2020**

Em 2010 Portugal aprovou a sua Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (EN AAC). A primeira fase de trabalhos da EN AAC decorreu entre 2010 e 2013 com os seguintes objetivos [12]:

- Reduzir a vulnerabilidade e aumentar a capacidade de resposta: de forma integrada, definir medidas que Portugal terá de adotar, à semelhança da comunidade internacional, com vista à minimização dos efeitos das alterações climáticas;
- Participar, sensibilizar e divulgar: aumentar a consciencialização sobre as alterações climáticas e os seus impactes;
- Cooperar a nível internacional: apoiando os países mais vulneráveis, designadamente no quadro da CPLP.

Foram desenvolvidos os trabalhos dos diversos grupos sectoriais e um relatório de progresso que realçou a natureza estratégica dos trabalhos efetuados, e identificou as limitações na implementação da estratégia. Da experiência adquirida foi promovida a revisão da EN AAC, colmatando as falhas e capitalizando os pontos fortes e oportunidades identificadas. Em 30 de julho foi aprovado a EN AAC 2020, enquadrando-a no Quadro Estratégico para a Política Climática (QEPiC), o qual estabelece a visão e os objetivos da política climática nacional no horizonte 2030, reforçando a aposta no desenvolvimento de uma economia competitiva, resiliente e de baixo carbono, contribuindo para um novo paradigma de desenvolvimento para Portugal [12].

## **Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC2030)**

O Plano Nacional integrado Energia Clima (PNEC) enquadra-se nas obrigações decorrentes de regulamentos do Parlamento Europeu e do Conselho, relativos à Governança da União da Energia e da Ação Climática, e será o principal instrumento de política energética e climática para a década 2021-2030. O PNEC define os contributos nacionais e principais linhas de atuação planeadas para o cumprimento dos diferentes compromissos globais da União, incluindo em termos de redução de emissões de gases com efeito de estufa, energias renováveis, eficiência energética e interligações tal como metas para o horizonte 2030 [13].

## **Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050**

Por ocasião da Cimeira de Ação Climática, Portugal submeteu às Nações Unidas, um ano antes do prazo, o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050, que constitui a sua Estratégia de Desenvolvimento a Longo Prazo com Baixas Emissões de Gases com Efeito de Estufa, prevista no Acordo de Paris.

O Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050, em julho de 2019 estabeleceu, de forma sustentada, a trajetória para atingir a neutralidade carbónica em 2050, define as principais linhas de orientação, e identifica as opções custo eficazes para atingir aquele fim em diferentes cenários de desenvolvimento socioeconómico. Atingir a neutralidade carbónica em Portugal implica a redução de emissões de gases com efeito de estufa entre 85% e 90% até 2050 e a compensação das restantes emissões através do uso do solo e florestas, a alcançar através de uma trajetória de redução de emissões entre 45% e 55% até 2030, e entre 65% e 75% até 2040, em relação a 2005 [14].

Resulta evidente, do elencado no documento estratégico atrás referido, que no sistema energético os transportes e o setor electroprodutor são os que apresentam maior potencial para a redução das emissões de GEE na década 2020-2030, sendo que a descarbonização dos edifícios e da indústria será mais intensa, respetivamente, nas décadas de 2030-2040 e 2040-2050 [15].

Consta também, no Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050, que a dependência energética, em 2050, será 20% inferior face a 2015, e que haverá mais de 85% de energia de fontes renováveis no consumo de energia final, tendo como linhas chave a total descarbonização do setor electroprodutor, residencial e serviços [15].

### **SCE - Sistema de Certificação Energética dos Edifícios**

A perspetiva de edifícios quase nulos em consumo de energia (NZEB - Nearly Zero Energy Buildings) e de bairros positivos de energia (Positive Energy Districts, PED) são aspetos que irão marcar o futuro dos edifícios. Pode antever-se um conjunto de oportunidades em torno destes conceitos não apenas de base tecnológica energética e digital, mas de novos modelos de negócio, integrados no conceito mais amplo de cidades inteligentes. Outro aspeto a ter em conta nos edifícios é a adoção de soluções de base natural que podem revestir parcialmente a envolvente dos edifícios, contribuindo para alterar o balanço energético dos mesmos. Crescentemente, os modelos de gestão dos edifícios focam, não apenas o edifício em si, mas o sistema local em que está inserido, seja pela possibilidade de produção própria, consumos partilhados

e modelos de negócio de base local, seja integrando a energia e outros recursos, como a água e a produção de alimentos [15].

Os impactes para o ambiente resultantes dos edifícios derivam principalmente da utilização de materiais que são extraídos da natureza, da sua transformação, e da sua demolição em fim de vida, e derivam ainda da energia necessária à manutenção das condições de conforto térmico e qualidade do ar no seu interior. As fases de extração construção e demolição também acarretam consumos de energia. A União Europeia tem a preocupação de promover a redução destes impactes no ambiente através da imposição a todos os EM de regras legais que reduzam cada vez mais a utilização de energia de origem fóssil na climatização dos edifícios, através de [16]:

- Redução das necessidades energéticas dos edifícios;
- Utilização primordial de fontes de energias renováveis nos edifícios;
- Promoção de uma maior flexibilidade na utilização de energia por parte das comunidades de cidadãos.

Neste sentido foram publicadas diretivas comunitárias que os EM transpõem para a sua legislação nacional. Relativamente às necessidades energéticas e desempenho dos edifícios importa sublinhar as Diretivas do Desempenho Energético dos Edifícios (Energy Performance Buildings Directive – EPBD) diretiva 2010/31/EU [17], diretiva 2018/844/EU [18] de 30 de maio de 2018, que foi atualizada pela versão mais recente, a 24 de abril de 2024, a diretiva 2024/1275/EU [19].

De toda esta Legislação transposta, e/ou em vias de o ser, destaca-se a preocupação da União Europeia no sentido de que todos os novos edifícios sejam de desempenho energético quase nulo (NZEB) e que seja elaborada uma Estratégia de Longo Prazo para a Renovação de Edifícios de modo a promover a renovação do parque habitacional por forma a que todos os edifícios sejam transformados em edifícios NZEB até ao ano de 2050.

No âmbito da Certificação Energética dos Edifícios, a Diretiva (UE) 2018/844 [18], de 30 de maio de 2018, trouxe algumas alterações relativamente à publicada anteriormente, por exemplo o reforço da utilização de sistemas energéticos renováveis, o desincentivo à utilização de sistemas alimentados a combustíveis fósseis, a integração de sistemas de carregamento destinados à mobilidade elétrica nos edifícios, sistemas de automatização e controlo dos edifícios, o indicador de aptidão para tecnologias inteligentes e ainda os procedimentos de manutenção e inspeção periódica [18].

A nova Diretiva relativa ao desempenho dos edifícios (UE) 2024/1275 [19] do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de abril, relativa ao desempenho energético dos edifícios foi, recentemente, publicada no Jornal Oficial da União Europeia a 8 de maio de 2024. Salvo situações específicas, os EM têm até 29 de maio de 2026 para transpor esta diretiva para a legislação nacional. Com o propósito de alcançar um parque imobiliário com emissões nulas até 2050, abrange fatores como as condições climáticas externas, as condições locais, os requisitos em matéria de qualidade do ambiente interior ou a relação custo-eficácia.

Consta na nova EPDB [19] que cada EM estabeleça um Plano Nacional de renovação de Edifícios que inclua um roteiro com objetivos nacionais para 2030, 2040 e 2050 que devam indicar as políticas e medidas nacionais que visem eliminar progressivamente a utilização de combustíveis fósseis no setor de aquecimento e arrefecimento e que procurem eliminar a utilização de caldeiras autónomas a combustíveis fósseis.

Visa ainda, quanto aos edifícios residenciais, que todos os EM devem estabelecer uma trajetória nacional para a renovação progressiva de todo o seu parque imobiliário residencial, que deve ser expressa como uma diminuição do consumo médio de energia primária em kWh/(m<sup>2</sup>.ano) no período de 2020 a 2050. A diminuição deve ser de, pelo menos, 16% em relação a 2020, até 2030 e de, pelo menos, 20-22% em relação a 2020, até 2035 [19].

A diretiva mencionada anteriormente, relativo aos novos edifícios, contém disposições para energia solar que incluem requisitos para os novos edifícios, com datas e limiares diferentes para os edifícios públicos, não residenciais e residenciais. Os edifícios públicos existentes também serão obrigados a instalar energia solar, com uma abordagem progressiva que começa em dezembro de 2027 para os maiores edifícios públicos (2.000 m<sup>2</sup>) e reduz progressivamente o limiar até dezembro de 2030 (250 m<sup>2</sup>).

O Decreto-Lei n.º 101-D/2020 [20], de 7 de dezembro, estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE).

A avaliação energética detalha as condições de exploração de energia de um edifício ou fração, com vista a identificar os diferentes vetores energéticos e a caracterizar os consumos, podendo incluir o levantamento das características da envolvente e dos sistemas técnicos, a caracterização dos perfis de utilização e a quantificação, monitorização e a simulação dinâmica dos consumos energéticos.

Para efeitos do disposto nos n.º 4 e 5 do artigo 4.º do Decreto-Lei n.º 101-D/2020 [20], de 7 de dezembro, o Manual SCE [21] estabelece a metodologia de cálculo para efeitos da avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios (DEE) abrangidos pelo Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), sendo revisto de dois em dois anos ou sempre que alterações de natureza técnica ou regulamentar o justifique.

### 1.1.5. Consumo de energia habitacional em Portugal

Como já mencionado anteriormente, os edifícios fazem parte do grande consumo energético, tanto a nível mundial como a nível nacional. Em 2021, relativamente ao ano anterior, registou-se um aumento do Consumo Energético Final em todos os setores de atividade, com exceção do doméstico que se manteve praticamente constante [22]. Analisando a Figura 1.12 nos últimos 20 anos, a indústria foi o setor que mais reduziu o seu peso no consumo energético, enquanto o setor doméstico foi o que mais aumentou.

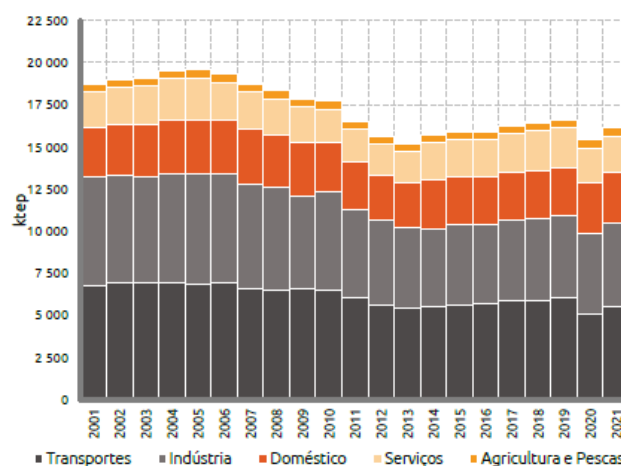


Figura 1.12 Evolução do consumo de energia final por setor de atividade [22]

Observando a Figura 1.13, em 2021, o consumo total de energia primária foi de 20 817 ktep, valor idêntico ao de 2020. Analisando o consumo de energia primária nos últimos 20 anos, observa-se uma Taxa de Crescimento Média Anual (TCMA) de -1,0%. De salientar que nos últimos 20 anos o consumo de petróleo e derivados diminuiu cerca de 50%, enquanto o consumo de renováveis e gás natural, no mesmo período, aumentou mais de 80%.

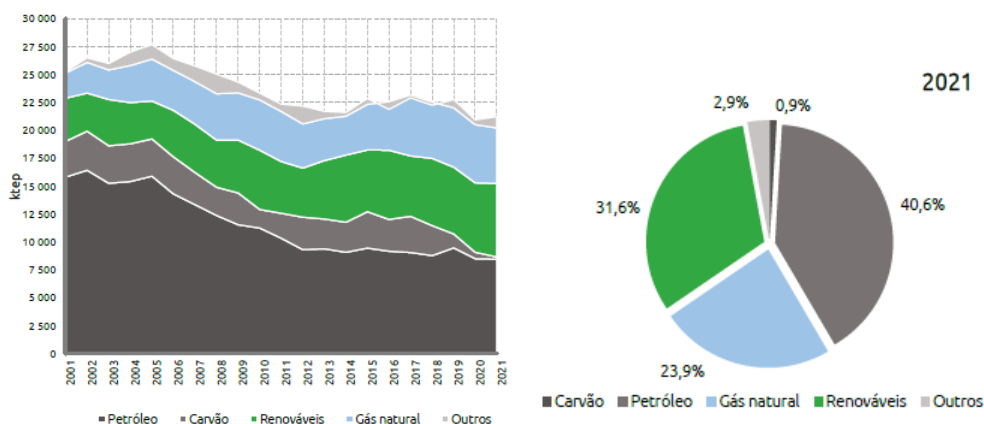


Figura 1.13 Evolução do consumo total de energia primária e distribuição total (%) 2021 [22]

A principal fonte de energia primária continuou a ser o petróleo (40,6%), seguido das renováveis (31,6%) e do gás natural (23,9%). (Figura 1.13)

Por sua vez, e para o mesmo ano, verifica-se que o consumo de energia final, o consumo de energia final (CEF) foi de 16 148 ktep (+4,8% face a 2020). Os produtos derivados do petróleo continuaram a ser a principal fonte de energia final (44,4%), seguido da eletricidade (25,2%), renováveis sem eletricidade (11,5%), gás natural (11,0%) e calor proveniente da cogeração (7,4%). O peso do consumo de produtos do petróleo tem vindo a decrescer nos últimos anos (60,6% em 2001 vs.44,4% em 2021), compensado pelo aumento do peso da eletricidade, gás natural e renováveis (Figura 1.14).

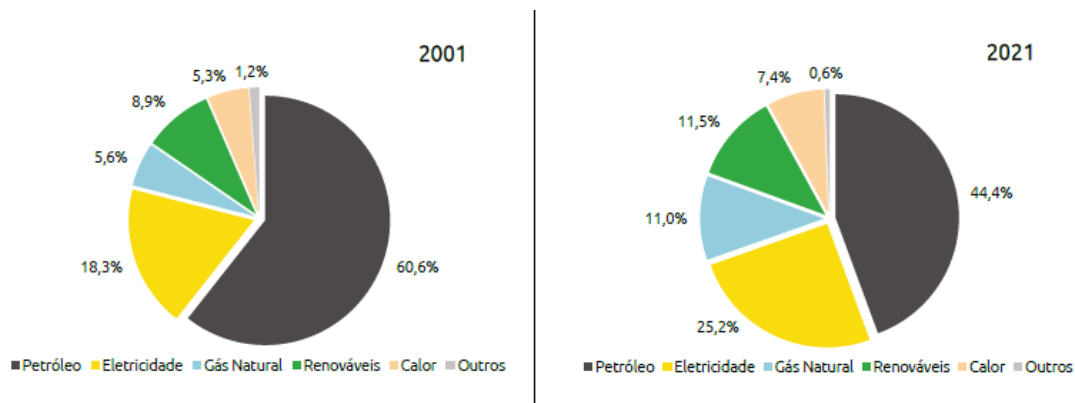


Figura 1.14 Distribuição do consumo total de energia final 2001-2021 [22]

Na UE, a energia mais utilizada em habitações é o gás natural (Figura 1.15). Em Portugal, a maioria da população não tem essa possibilidade, uma vez que a rede de distribuição de gás natural, localizada sobretudo nas grandes áreas urbanas, apenas abrange 34 % das famílias. Deve-se também ter em consideração que a maioria da população portuguesa utiliza ainda gás de botija em casa, sendo que este é mais caro que o gás canalizado e ainda não está coberto por tarifas sociais que apoiem o consumo

dos mais vulneráveis, embora seja utilizado pela maior parte das famílias menos favorecidas economicamente [2].

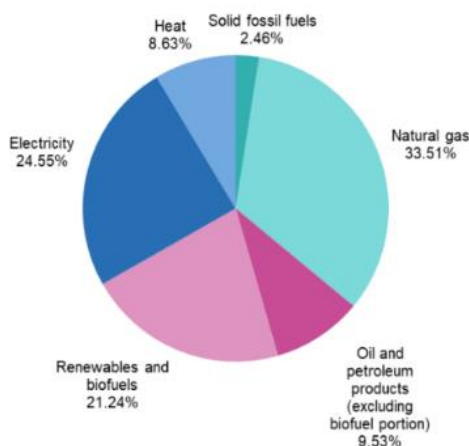


Figura 1.15 Consumo energia final, por tipo de energia, em habitações, UE, 2021 [23]

Em Portugal, maior parcela de consumo de energia afeta ao sector doméstico tem ocorrido na cozinha, correspondendo a 34,6% do total do consumo de energia (Figura 1.16). Seguiu-se o Aquecimento do ambiente, com um consumo correspondente a 23,2%, os Equipamentos elétricos (19,9%) e o Aquecimento de águas (19,7%). Por oposição, foi no Arrefecimento do ambiente e na Iluminação que o consumo de energia nos alojamentos foi menor. De sublinhar que para aquecimento e AQS, estas duas necessidades requerem cerca de 43% do consumo total de energia das habitações.

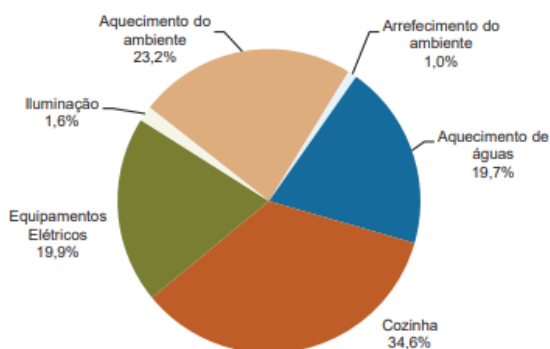


Figura 1.16 Distribuição do consumo de energia no setor doméstico por tipo de utilização - Portugal 2020 [24]

Analisando o consumo de energia no sector doméstico por tipo de fonte, verifica-se que, em 2020, a eletricidade foi a principal fonte de energia consumida, representando 39,1% do total de energia consumida neste sector, seguindo-se a biomassa (lenhas, pellets, briquetes e carvão vegetal) com 25,9%, o GPL com 13,2%, o gás natural (9,8%), as bombas de calor (8,5%), o solar térmico (1,8%) e o gasóleo de aquecimento (1,7%). (Figura 1.17)

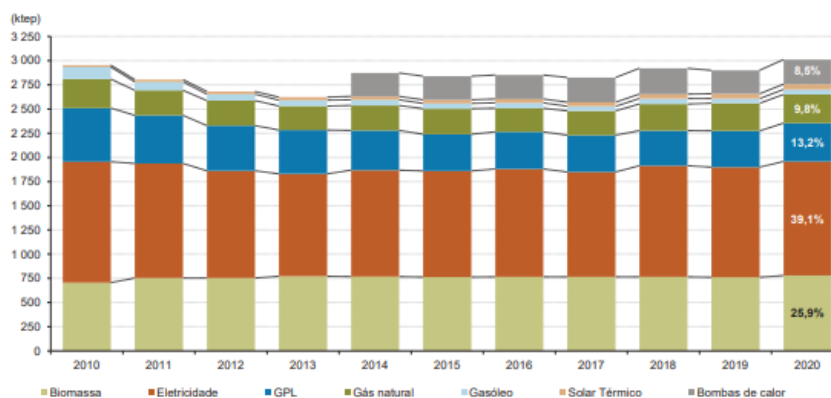


Figura 1.17 Consumo de energia no setor doméstico por tipo de fonte, Portugal 2020 [24]

É evidente, alargando agora o foco temporal, que entre 2010 e 2020 houve um decréscimo acentuado do consumo doméstico das fontes de energia menos "limpas", nomeadamente, do gasóleo de aquecimento, 58,2%, e do GPL, 28,5%. Importa ainda realçar a diminuição no consumo, para este setor, da eletricidade, 5,6%, e do GN, 1,9%. Por outro lado, no mesmo período, a utilização de biomassa subiu 10%, tendo o solar térmico registado o maior aumento, 187%. (Figura 1.17).

O Aquecimento do ambiente correspondeu à segunda maior utilização doméstica de energia. Analisando a Figura 1.18, verifica-se que a principal fonte de energia utilizada para o Aquecimento do ambiente foi a Biomassa (81,2%) e que na sua maioria (92%) correspondeu a lenha. De salientar que mais de um terço da biomassa consumida para o aquecimento do alojamento não foi comprada, levando a que a despesa com esta fonte de energia fosse bastante inferior às restantes. De seguida, surgiu a Eletricidade (7,6%), o Gasóleo de aquecimento (4,6%), o GPL Garrafa (3,2%) e o Gás Natural (2,7%). O GPL Canalizado e os Sistemas solares térmicos (0,5% e 0,2%, respetivamente) tiveram uma importância muito residual para este tipo de utilização. A eletricidade, apesar de corresponder a apenas 7,6% do consumo total, representou mais de 30% da despesa global para aquecimento do alojamento [24].

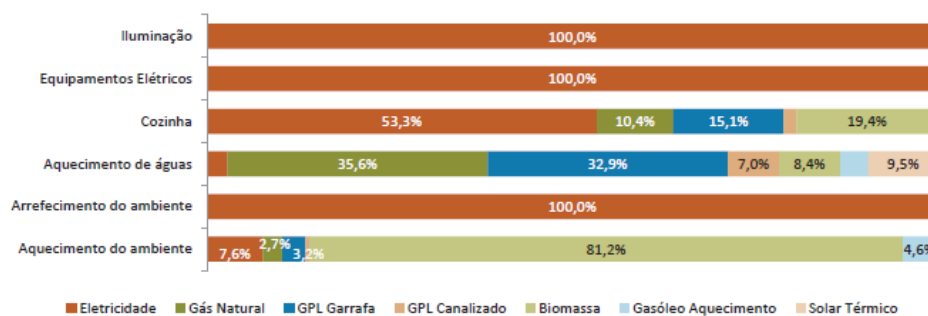


Figura 1.18 Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de utilização e tipo de fonte de energia – Portugal, 2020 [24]

O Aquecimento de águas foi maioritariamente assegurado recorrendo ao gás (Gás Natural e GPL) como fonte de energia (cerca de 3/4 do consumo total – Figura 1.18). O Gás Natural teve um peso de 35,6% do total de consumo para este tipo de utilização, seguido do GPL Garrafa (32,9%) e do GPL Canalizado (7,0%). Por sua vez, a Eletricidade foi a principal fonte de energia utilizada na Cozinha, correspondendo a cerca de 53,3% do consumo total (34% em 2010), seguida da Biomassa (19,4%), do GPL Garrafa (15,1%) e do Gás Natural (10,4%). O GPL Canalizado teve um peso residual no consumo de energia na Cozinha (1,8%). Nota para a Biomassa, cujo consumo surgiu em segundo lugar.

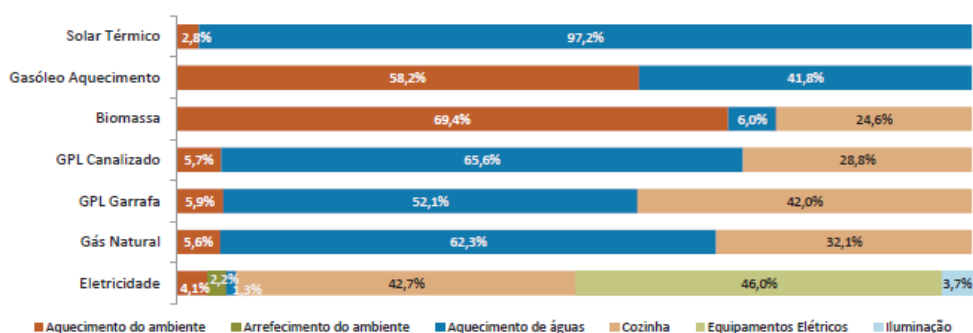


Figura 1.19 Distribuição do consumo de energia no alojamento por fonte de energia e tipo de utilização – Portugal, 2020 [24]

Numa análise por fontes de energia, verificou-se que a Eletricidade foi a única fonte de energia comum a todos os tipos de uso, o que reflete a crescente eletrificação dos alojamentos. Os Equipamentos elétricos (46,0%) e a Cozinha (42,7%) constituíram as duas principais fontes de consumo da Eletricidade, que no conjunto representaram cerca de 89% do total do consumo de Eletricidade no alojamento, em 2020. (Figura 1.19)

A Iluminação perdeu peso no consumo de eletricidade face a 2010. Em 2020, a Iluminação representou 3,7% (13,6% em 2010) do consumo total de Eletricidade nos alojamentos e 3,9% da despesa global com este tipo de energia, correspondendo assim à quarta principal utilização de Eletricidade no alojamento. O Arrefecimento do ambiente representou 2,2% do total de consumo de eletricidade. O GPL Canalizado, o Gás Natural e o GPL Garrafa foram essencialmente utilizados no Aquecimento de águas e na Cozinha. O Gasóleo de Aquecimento foi utilizado no Aquecimento do ambiente (58,2%) e no Aquecimento de águas (41,8%). A Biomassa consumida nos alojamentos, em 2020, destinou-se principalmente ao Aquecimento do ambiente (69,4%) e à Cozinha (24,6%). A utilização de Biomassa para o Aquecimento de águas registou um peso reduzido (6,0%). O consumo de energia Solar térmica teve ainda pouca expressão

comparativamente com as principais fontes de energia, porém é de salientar a sua utilização no Aquecimento de águas (após o Gás Natural e o GPL Garrafa) [24].

Paralelamente aos objetivos traçados nacionalmente, e pela União Europeia, é evidente o impacto que o setor dos edifícios tem nos consumos e produção de energia. Da mesma forma, o aquecimento em habitações contabiliza uma parcela significativa no consumo energético neste setor. Desta forma, inevitavelmente, torna-se indispensável que a utilização da energia seja feita de forma racional e justa, permitindo o controlo dos níveis de emissões de poluentes atmosféricos, bem como aplicação de critérios que permitam a redução de consumos energéticos nos edifícios.

Sendo a pobreza energética, claramente, um problema que afeta a realidade portuguesa, torna-se indispensável que se proporcionem medidas para a redução dos índices que representam fatores chave na avaliação desta problemática. Estando diretamente ligado aos edifícios, o aproveitamento na utilização de fontes de energia para o aquecimento deve ser pensado e estudado, de forma a direcionar a aplicação dessas medidas à população, especificamente, e direcionar os esforços no sentido correto.

## **1.2. Revisão Bibliográfica**

Conforme elencado anteriormente, a pobreza energética é uma problemática que hoje em dia já ganhou algum reconhecimento, e os índices que a avaliam demonstram que Portugal se encontra numa posição muito desfavorável, comparativamente a outros países da UE. Este termo não ganhou recentemente a devida importância, sendo que se torna necessário um esforço a nível social e científico para oferecer soluções que consigam amenizar e mitigar as consequências desta característica endógena ao país.

Sendo que os consumos de energia no setor doméstico e equipamentos para o aquecimento estão ligados a esta problemática, os softwares de simulação energética atuam como uma ferramenta que permite a otimização do desempenho dos edifícios quanto aos seus consumos e utilização de energia, que por sua vez permite a aplicação de medidas que visem a eficiência energética e consequente diminuição das emissões de dióxido de carbono.

Os próximos subcapítulos apresentam os esforços de investigação relevantes elaborados no âmbito destas temáticas.

### 1.2.1. Pobreza energética

Embora já existissem ideias relacionadas com a incapacidade para o aquecimento no setor doméstico em parte da população mundial, a pobreza energética teve o início do seu ímpeto no Reino Unido e Irlanda. Em 1993 Campbell, R. [25] discutiu conceitos nesta medida e o termo que apareceu inicialmente era denominado como “fuel poverty” (pobreza de combustível), como consequência económica e social da crise de petróleo nos anos 70. Os padrões relativos a baixos rendimentos, inacessibilidade a equipamentos de aquecimento habitacional e o rápido aumento dos custos de energia exacerbou o problema, que até então não acompanhava medidas para a sua resolução.

Em 2002, Healy, J. D., & Clinch, J. P. [26] levaram à discussão a limitada existência de trabalho empírico para examinar a relação entre “fuel poverty” e conforto térmico, associado à incapacidade de aquecimento em habitações. Este artigo traria uma nova pesquisa na Irlanda (que teria níveis similares de pobreza de combustível comparativamente ao Reino Unido) para examinar os fatores principais relacionados com esta matéria. Tendo o estudo entregue particular atenção às diferenças dos perfis de idades afetados pelo desconforto térmico, este demonstrou que dois terços dos agregados familiares manifestavam ter frio nas suas habitações, e que mais de metade dos pertencentes à população idosa, enfrentavam temperaturas inadequadas no interior das suas casas, durante o inverno.

A problemática começava a ganhar algum reconhecimento e complexidade, sendo hoje mais representado como pobreza energética, embora possam existir algumas diferenças, nomeadamente na sua caracterização e nos fatores para a sua avaliação e medição. Mais estudos começaram a ser publicados, particularmente na Europa Oriental em que o problema continuava a passar como invisível para os estados governamentais devido ao seu carácter privativo e à não existência de métodos convencionais para o alívio da pobreza energética endógeno à população afetada. Esta problemática tornou-se um grande desafio para países em desenvolvimento, onde a dependência de métodos tradicionais para o aquecimento das habitações conduzia a impactes significativos na saúde dos ocupantes, e a criação de fundos sociais para combater o problema já começava a ser tomado em medida. (Sagar, A. D. [27] e Buzar, S. [28])

Dada a sua complexidade, começaram a ser elaboradas avaliações e índices para medir e monitorizar a pobreza energética de forma a atuar mais eficazmente sobre esta urgência. Pachauri, S., & Spreng, D. [29] referenciava que, em períodos precedentes, o foco encontrava-se maioritariamente nos outputs do conceito e não na raiz e

especificidade do problema. Em 2016 Papada, L., & Kaliampakos, D. [30] utilizou indicadores para medir este índice, nomeadamente a incapacidade para manter a habitação devidamente aquecida, atrasos no pagamento de rendas/contas, infiltrações, problemas de saúde e inacessibilidade a bens essenciais, concluindo que se torna importante o foco em medidas e incentivos que permitam melhorar a qualidade de construção dos edifícios e assim possibilitar custos mais acessíveis para a operação e utilização de diversas soluções para o aquecimento em habitações.

Segundo Guerra, I. [31], no panorama português, perante a pequena intervenção do Estado, as graves carências habitacionais verificadas na segunda metade do século XX desencadearam um surto de construção clandestina, sobretudo nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto. Estima-se que na década de 1970 cerca de 40% das habitações do país não estivessem licenciadas.

Segundo Horta, A., & Schmidt, L. [3], no parque habitacional português, tendencialmente, são utilizados fracos níveis de construção e isolamento térmico, pois, aliado à incapacidade financeira de muitos utilizadores para realizar renovações, apenas a partir de 1990 foi criada legislação que contemplava as condições térmicas dos edifícios. Em Portugal as habitações eram, e algumas ainda são, construídas sem sistemas de aquecimento ou apenas com lareira (que é muito pouco eficiente, e exige um esforço físico considerável para ser alimentada, vigiada e limpa). Esta prática raramente se verifica nos outros países da UE onde quase todas as habitações têm sistemas fixos de aquecimento, ou aquecimento central. Assim, grande parte da população acaba por recorrer a pequenos aquecedores elétricos, de baixo custo de aquisição e elevados custos de operação, tendendo a prolongar o tempo de utilização dos equipamentos até que estes deixem de funcionar, com eficiências reduzidas. Para além disso, à falta de capacidade financeira, no território português, existe a prática de privilegiar o aquecimento corporal através de roupas, calçado ou mantas, sendo que, mesmo que existam os pequenos equipamentos para aquecimento da habitação, estes apenas são ligados nos dias mais extremos, durante pequenos períodos.

Em 2024, num estudo de Kashour, M. & Jaber, M [4] foi elaborado um método para a criação de um índice composto com base em fatores chave para a medição da pobreza energética (mencionado no capítulo 1.1.1), salientando-se a 24<sup>a</sup> posição de Portugal, de entre os 27 estados membros avaliados neste estudo (Tabela 1.1), tendo como significado um elevado índice de pobreza energética para o país. (Figura 1.2)

Por sua vez, em Burguilho M. et al. [32] foi possível concluir que a pobreza energética aumenta a probabilidade de utilização de fontes energéticas de elevada

intensidade carbónica para o aquecimento de habitações, e que a pandemia COVID e a guerra na Ucrânia afetaram esta relação. Foi ainda constatado que a pobreza energética relacionada com a escolha de equipamentos de aquecimento afeta negativamente os objetivos de descarbonização mundial.

Segundo Abreu, M. I., et al [33], geralmente, as políticas para convencer os proprietários a renovar as suas casas de acordo com regras estabelecidas, podem ser frequentemente muito rigorosas e exigentes. São negociadas a um nível superior pelos decisores políticos com base em premissas comuns, relacionadas com a poupança de energia e na aquisição de novas tecnologias. No entanto, para compreender o motivo dos proprietários decidirem renovar a habitação é necessário considerar fatores pessoais e contextuais, juntamente com fatores sociais, como a dinâmica cotidiana da vida em casa, rotinas, estilos de vida e práticas socialmente compartilhadas. Em Portugal, as diferentes gerações de proprietários devem ser tratadas de forma diferente nas políticas e incentivos criados para alavancar a tendência de renovação que as estratégias europeias definem como prioritárias.

O conceito de pobreza energética foi introduzido pela primeira vez no direito da UE em 2009 e, desde então, foi alargado na narrativa de uma transição energética justa e equitativa e, ao longo da última década, a UE aumentou os seus esforços e fez da pobreza energética um conceito-chave [1].

Em 2016, a Comissão Europeia lançou a iniciativa Observatório da Pobreza Energética (EPOV) e, em 2017, o Pilar Europeu dos Direitos Sociais que inclui a energia como um serviço essencial a que todos têm direito. O pacote Energia limpa para todos os europeus (2019) introduziu obrigações para identificar, monitorizar e abordar a pobreza energética através dos Planos Nacionais de Energia e Clima. Em 2020, a Comissão Europeia emitiu sua primeira diretriz sobre pobreza energética como parte da Estratégia da Renovação Energética. Esta recomendação forneceu orientações sobre métricas apropriadas para avaliar a pobreza energética, estimulou a troca de melhores práticas entre os Estados Membros (EM) e destacou alguns programas de financiamento que priorizam a implementação de medidas viradas para grupos vulneráveis. O Centro de Aconselhamento para a Pobreza Energética (EPAH) é uma das principais iniciativas da UE que visa erradicar a pobreza energética. Foi lançado pela Comissão em 2021, a pedido do Parlamento Europeu, e baseia-se no projeto «Observatório da Pobreza Energética da UE» [1].

## 1.2.2. Simulação e eficiência energética em edifícios

As ferramentas de design têm sido, tradicionalmente, construídas tentando reduzir a complexidade do processo subjacente às equações do sistema, na tentativa de diminuir a carga computacional e as entradas correspondentes aos dados inseridos pelo utilizador. Para uma simulação energética, é construído um modelo matemático para representar as possíveis trocas de massa e energia e suas interações. Neste sentido, a simulação é uma tentativa de emular a realidade [34].

O programa computacional BRIS foi apresentado pela primeira vez, na Suécia, em 1963. Desde então, foi ampliado diversas vezes com o objetivo de melhorar o tratamento de dados, aproveitando o feedback do programa. O BRIS, desenvolvido no *Royal Institute of Technology*, em Estocolmo, utilizava para cálculo as variações de temperatura numa sala utilizando um sistema de equações de balanço térmico, resolvidas por um método iterativo baseado em diferenças finitas. A transferência de calor por condução dentro de paredes e pisos, a convecção entre superfícies e ar, e radiação entre superfícies, foram levadas em conta em cada passo de tempo [35].

Após a apresentação do BRIS, começaram a surgir imensos programas para *Building Performance Simulation* (BPS – Simulação de Desempenho de Edifícios) incluindo o BLAST [36], DOE-2 [37], TRNSYS [38], e mais tarde o EnergyPlus [39], DesignBuilder [40], entre muitos outros.

Num estudo de Rahman et al. [41] foram avaliadas medidas de conservação de energia num edifício institucional por simulação dinâmica, utilizando o DesignBuilder. Os resultados da simulação foram verificados, com dados medidos, e depois comparados com diferentes estratégias de conservação de energia.

Sendo que o DesignBuilder possui uma interface amigável e consegue avaliar a utilização ideal de luz natural, energia solar, sombreamento, simulação térmica com ventilação natural de edifícios, cálculo de potências de aquecimento e arrefecimento, e consumos energéticos, torna-se adequado para o estudo e comparação de diversas soluções construtivas em edifícios. Blanco et al., [42], demonstrou que o DesignBuilder foi capaz de utilizar conceitos de design para alavancar o desempenho energético de várias habitações em várias zonas climáticas de Espanha, através de melhorias construtivas no edifício.

Segundo Mustafaraj et al. [43] os resultados simulados no DesignBuilder e Energyplus, para um modelo de um edifício universitário, foram comparados e validados com os medidos em campo, incluindo temperatura interior, humidade relativa,

coeficiente de desempenho (COP) para bomba de calor, e poupanças e consumos energéticos. De uma forma semelhante, Abba, H. Y, et al. [44] conduziu uma validação por comparação de resultados simulados e medidos (temperatura e humidade relativa) para o interior de um edifício escolar.

Segundo Lynn, T. et al. [45] as simulações oferecem muitas vantagens em comparação a um projeto conceitual. Por exemplo, o BPS oferece a capacidade de examinar diversas soluções durante a fase de projeto como a eficiência dos equipamentos e integração do edifício, reduzindo assim o tempo de desenvolvimento, consumos de energia e emissões de poluentes. Além disso, o BPS permite a simulação de aquecimento/arrefecimento num edifício, ventilação, e sistemas de ar condicionado para definir a configuração ideal.

Consta no Manual SCE [21], que as necessidades e consumos de energia do edifício, para cálculo dos consumos anuais de energia primária no edifício, devem ser determinadas com base em simulação dinâmica multizona (SDM). A SDM, para determinação das necessidades referidas, deve ser realizada por programa acreditado pela Norma ASHRAE 140 [46]. No caso do DesignBuilder, em que utiliza o EnergyPlus como motor de cálculo, faz parte dessa lista de softwares acreditados pela norma anteriormente referida [47].

A procura ao investimento de soluções que permitam melhorar os índices de conforto nas habitações portuguesas bem como a diminuição dos índices de pobreza energética, revela-se de grande importância para o presente estudo. A utilização de ferramentas de simulação energética permite que os estudos sejam elaborados de forma eficaz com vista ao aproveitamento de medidas de eficiência energética que melhorem o desempenho dos edifícios, particularmente na envolvente e diferentes soluções para o aquecimento de habitações. A análise de diferentes fontes energéticas em vários vetores permite o melhor entendimento do impacto que estas causam nos custos inerentes à criação e manutenção de conforto térmico em habitações

### **1.3. Objetivos do trabalho**

Com o desenvolvimento apresentado nos capítulos anteriores, ficou evidente a importância do estudo energético dos edifícios através de modelação e simulação com recurso a software apropriado, que ofereça resultados válidos e viáveis. Tornando-se, dessa forma, possível reduzir os consumos energéticos associados aos edifícios, bem como o seu impacto ambiental.

Sendo as elevadas faturas de energia, a qualidade construtiva das habitações e a inacessibilidade a sistemas de aquecimento e suas eficiências, fatores chave para a medição da pobreza energética, torna-se indispensável este tipo de análise, possibilitando o estudo de soluções energéticas que, por um lado, reduzam os índices aliados a esta temática, e, por outro, consigam abrandar os elevados consumos energéticos e seus custos associados, relacionados com o aquecimento das habitações portuguesas, principalmente em regiões mais isoladas.

Neste âmbito, a presente dissertação baseia-se no estudo comparativo entre diversas fontes de energia para o aquecimento de uma habitação isolada na região de Samora-Correia/Benavente, utilizando o DesignBuilder [39], para a comparação das diferentes soluções nas vertentes energética, ambiental e financeira, o que não é apresentado nos estudos mencionados anteriormente. Através de um software de simulação energética, de ampla utilização e aplicação, analisar as várias vertentes associadas às diversas fontes energéticas para o aquecimento da habitação em estudo. Terá como principal objetivo verificar qual a solução consegua oferecer, resultados mais atrativos nas vertentes acima referidas, com o intuito de apresentar soluções que possibilitem mitigar as consequências desta característica endógena ao país, e que possam ser alargadas a muitos outros casos semelhantes que persistem em Portugal.

## **1.4. Estrutura do trabalho**

A estrutura da presente dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos principais.

O primeiro capítulo está desenvolvido numa base introdutória, com um enquadramento, familiarizando o leitor com a temática, incluindo os temas de maior importância como os grandes consumos energéticos em edifícios e o persistente problema endógeno ao país, a pobreza energética. Neste capítulo também é elaborada uma pequena revisão bibliográfica relativamente ao tema em estudo.

O segundo capítulo é inicializado com alguns conceitos fundamentais que permitirão a análise posterior dos resultados, nos últimos capítulos. A análise dos consumos de energia primária, nomeadamente em edifícios, e análise através de simulação energética constam presentes como parte destes conceitos. Uma pequena formalização das equações que regem a modelação e considerações matemáticas para a análise do caso de estudo, está presente no final deste capítulo.

O terceiro capítulo aplica a modelação, cálculo e simulação computacional aliado à caracterização do sistema, cálculo da potência de aquecimento e as simulações energéticas para as diversas soluções em estudo: eletricidade, biomassa e combustíveis de origem fóssil. Neste capítulo é também efetuada a discussão dos resultados, analisando comparativamente os vetores de energia, ambiente e custo, relativamente às soluções apresentadas.

No quarto, e último capítulo é apresentada uma síntese do trabalho realizado, incluindo as conclusões principais e algumas sugestões para trabalho futuro.

## **2. Alguns conceitos fundamentais e caso de estudo**

A incapacidade para manter as habitações aquecidas, e os custos elevados de energia permanecem variáveis fundamentais para a avaliação da pobreza energética. Portugal encontra-se numa posição muito desfavorável dentro desta problemática, comparado aos países da UE, tornando-se essencial a sua análise para que seja possível criar condições para ambientes interiores, nomeadamente na estação de aquecimento, e alavancar os índices de pobreza energética.

Existem várias soluções para o aquecimento de habitações, e estas diferem, não apenas na sua operação e tecnologia, mas principalmente no tipo de energia primária consumida. Uma vez que têm o seu impacto nas faturas e consumos energéticos, é de elevada importância o seu estudo de forma a avaliar para cada caso particular, qual a fonte energética que melhor corresponde aos requisitos e necessidades. Consequentemente, os fatores de emissão de dióxido de carbono também irão divergir, revelando-se fundamental a análise das soluções mais atrativas na vertente ambiental, correspondendo também aos objetivos para a UE.

### **2.1. Energias para o aquecimento**

Um produto energético primário é extraído ou capturado diretamente de recursos naturais, como petróleo bruto, lenha, gás natural ou carvão. Este processo é denominado produção primária. Os produtos energéticos secundários (como a eletricidade ou a gasolina para motores) são produzidos como resultado de um processo de transformação, quer a partir de um produto energético primário, quer de um produto energético secundário diferente. Os consumidores finais podem utilizar produtos energéticos primários (por exemplo, gás natural para aquecimento) ou secundários (como gasolina para motores de automóveis) [48].

Quando a produção energética de um país (produção primária) não é suficiente para satisfazer a sua procura de energia (consumo de energia final), parte dessa energia precisa de ser importada a partir de países terceiros ou retirada de armazenamentos (quantidades de energia que podem ser armazenadas durante um determinado período de tempo e serem utilizadas posteriormente). Uma vez disponíveis, principalmente através da produção ou da importação, os produtos energéticos podem ser consumidos diretamente (por exemplo, gás que é queimado para aquecimento numa caldeira doméstica) ou podem passar por um processo de transformação para serem transformados num produto energético diferente (por exemplo, petróleo bruto em gasolina para motores numa refinaria, ou gás transformado em eletricidade numa central elétrica) e depois ser exportado ou consumido (Figura 2.1) [49].

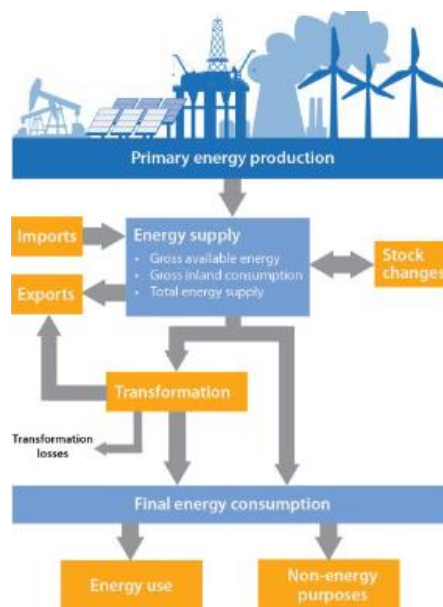


Figura 2.1 Diferentes etapas do fluxo de energia [49]

Um diagrama de *Sankey* é uma ilustração gráfica de fluxos – como energia, material ou dinheiro – onde podem ser combinados, divididos e traçados através de uma série de eventos ou fases (Figura 2.2). A largura de cada fluxo representa a quantidade de material ou energia no fluxo [50].



Figura 2.2 Diagrama de Sankey genérico [50]

Um balanço energético apresenta os produtos energéticos (combustíveis sólidos, petróleo e produtos petrolíferos, gás, energias renováveis, energia nuclear, eletricidade,

etc.) de um país e a sua produção, transformação e consumo por diferentes tipos de fatores económicos (indústria, transportes, etc.). O diagrama permite visualizar a quantidade total de energia extraída do meio ambiente, comercializada, transformada e utilizada pelos consumidores finais. Os balanços energéticos podem ser representados graficamente através de diagramas de *Sankey*, que permitem a inter-relação dos produtos energéticos de uma forma mais ilustrativa [48].

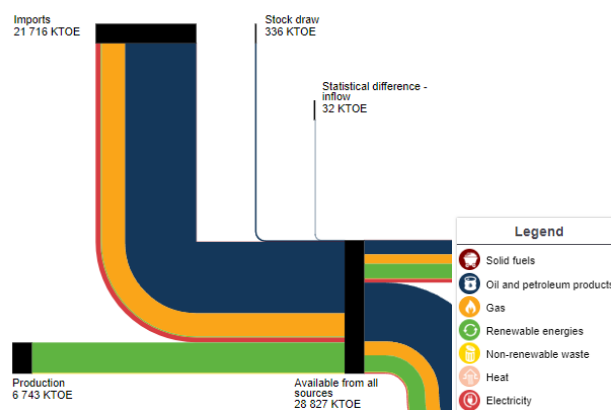


Figura 2.3 Diagrama de Sankey Portugal (a) Importações e produção (2022) [51]

Pela Figura 2.3, é possível verificar que Portugal continua a depender fortemente das importações de produtos energéticos, nomeadamente petróleo e produtos petrolíferos, sendo que a produção de energias renováveis se encontra com um valor de 6743 KTOE, cerca de 23% da energia total disponível no país (28 827 KTOE).

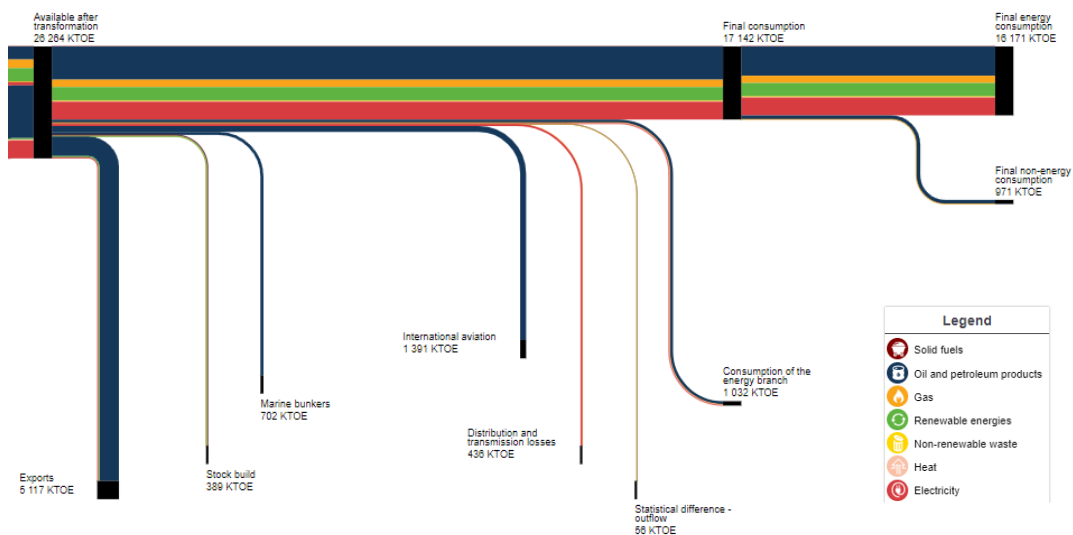


Figura 2.4 Diagrama de Sankey Portugal (b) Energia final para consumo, exportações, outros (2022) [51]

Das importações e produção apenas 17142 KTOE chegam ao consumo final (excluindo as exportações, aviação, etc.) depois dos produtos energéticos sofrerem

transformação (26264 KTOE depois de transformação, cerca de 9% de perdas energéticas). Parte da energia é destinada a consumos não energéticos (por exemplo óleo utilizado como conservante de madeira) resultando para o consumo final no país 16171 KTOE. (Figura 2.4)

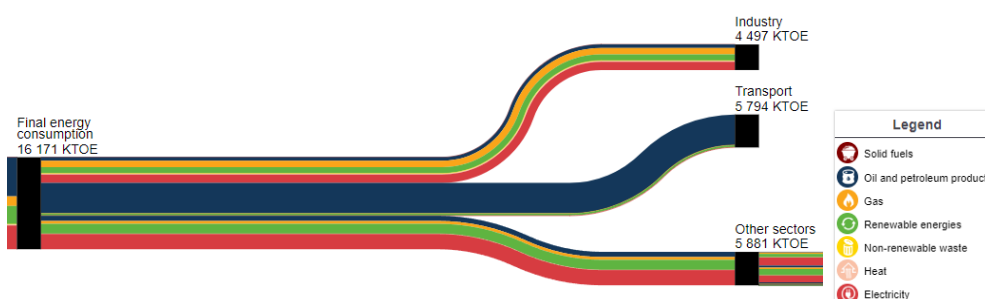


Figura 2.5 Diagrama de Sankey Portugal (c) Energia diferentes setores (2022) [51]

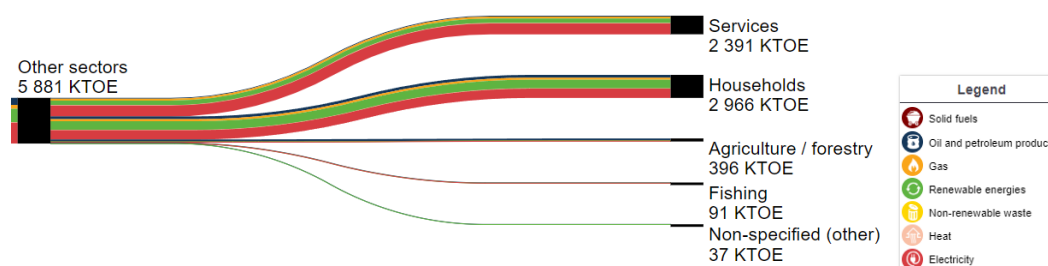


Figura 2.6 Diagrama de Sankey Portugal (d) serviços, domésticos, agricultura, outros [51]

Observando as Figuras 2.5 e 2.6, é possível verificar que a energia final disponível para o setor doméstico se encontra em cerca de 2966 KTOE. Não é o setor mais consumidor de energia no país, sendo que os transportes superam, nomeadamente através de energia proveniente de produtos petrolíferos.

Conforme já mencionado anteriormente, as energias utilizadas para o aquecimento encontram-se com cerca de 23% do consumo total de energia no parque habitacional. Também foi possível registar que o aquecimento de águas foi maioritariamente assegurado recorrendo ao gás (Gás Natural e GPL) como fonte energética, contabilizado em cerca de 3/4 do consumo total para AQS.

De sublinhar ainda que para aquecimento do ambiente, este foi conseguido maioritariamente através de produtos de biomassa (81,2%). Este é um valor que faz refletir a forma como os portugueses olham para o aquecimento em suas casas, e recorrem a soluções que tendem a ser mais baratas a curto prazo, por vezes limitando o investimento em equipamentos com melhores eficiências.

Segundo o Manual SCE [21] a avaliação do DEE resulta na determinação de uma classe energética, em função da relação dos consumos de energia primária, tendo em conta a contribuição de fontes de energia renovável, entre os edifícios previsto e de referência, expressos através de um indicador de energia primária em kWh/(m<sup>2</sup>.ano). O balanço de energia primária do edifício previsto, representado pelas necessidades nominais anuais de energia primária (*Ntc*), é determinado em função das necessidades de aquecimento e arrefecimento ambiente, preparação de AQS e ventilação mecânica, e do contributo de energia proveniente de sistemas que recorram a fontes de energia renovável para autoconsumo nestes usos. As necessidades de energia útil são convertidas para consumos de energia final, afetando as mesmas da eficiência dos sistemas técnicos, e estes consumos são convertidos para energia primária, através do fator de conversão (*Fpu*).

As necessidades nominais anuais de energia primária de referência (*Nt*) correspondem ao total de energia primária para satisfazer anualmente as necessidades de aquecimento e arrefecimento ambiente e de preparação de AQS do edifício de referência, admitindo a inexistência de consumos de energia associados ao funcionamento de sistemas de ventilação mecânica e de sistemas de aproveitamento de energias renováveis [21].

Podem-se observar os fatores de conversão de energia final para energia primária (*Fpu*) a utilizar na determinação das necessidades nominais anuais de energia primária (*Ntc*) em edifícios de habitação na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Fatores de conversão de energia final para energia primária [21]

Tipo de Energia	<i>Fpu</i> [kwh <sub>EP</sub> /kWh]
Eletricidade, independentemente da origem (renovável ou não renovável)	2.5
Combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos não renováveis	1.0
Energia térmica de origem renovável	1.0
Energia proveniente da rede urbana de frio e calor da Climaespaço, Parque das Nações, Lisboa	1.06
Energia proveniente de sistemas de cogeração no edifício de referência	1.86
Energia proveniente de sistemas de trigeriação no edifício de referência	1.70

Para a determinação das emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao consumo de energia dos edifícios, os fatores de conversão de energia já traduzida na sua forma primária para emissões de CO<sub>2</sub> estão presentes na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Fatores de conversão de energia primária para emissões de CO<sub>2</sub> [21]

<b>Tipo de Energia</b>	<b>Fator de conversão [kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>EP</sub>]</b>
Eletricidade	0.144
Gasóleo	0.267
Gás natural	0.202
GPL canalizado (propano)	0.170
GPL garrafas	0.170
Renovável	0
Energia proveniente da rede urbana Climaespaço	0.006

Nos edifícios de habitação, a classe energética é determinada em função do rácio de classe energética ( $R_{Nt}$ ), que resulta da relação entre as necessidades nominais de energia primária previstas e de referência, conforme Equação 2.1. A classe energética é obtida pela correspondência entre o valor de  $R_{Nt}$  e os intervalos apresentados na Tabela 2.3.

$$R_{Nt} = \frac{N_{tc}}{N_t} \quad (2.1)$$

Em que:

$R_{Nt}$  – Rácio de classe energética em edifícios de habitação;

$N_{tc}$  – Necessidades nominais anuais de energia primária [kWhEP/(m<sup>2</sup>.ano)];

$N_t$  – Necessidades nominais anuais de energia primária de referência [kWhEP/(m<sup>2</sup>.ano)].

Tabela 2.3 Intervalos de valor de  $R_{Nt}$  para edifícios de habitação [21]

<b>Classe Energética</b>	<b><math>R_{Nt}</math></b>
<b>A+</b>	$R_{Nt} \leq 0.25$
<b>A</b>	$0.25 < R_{Nt} \leq 0.50$
<b>B</b>	$0.50 < R_{Nt} \leq 0.75$
<b>B-</b>	$0.75 < R_{Nt} \leq 1.00$
<b>C</b>	$1.00 < R_{Nt} \leq 1.50$
<b>D</b>	$1.50 < R_{Nt} \leq 2.00$
<b>E</b>	$2.00 < R_{Nt} \leq 2.50$
<b>F</b>	$R_{Nt} \geq 2.50$

## 2.2. Software de Simulação Energética – Modelação Numérica

O DesignBuilder [40] é um ambiente de modelação “*user friendly*” onde se pode trabalhar com modelos de construção virtuais. Fornece uma série de dados de desempenho energético e ambiental (por exemplo consumo de energia e emissões de carbono) condições de conforto, iluminância diurna, temperaturas máximas e capacidades de componentes HVAC. O software utiliza o motor de simulação dinâmica do Energyplus [39] para gerar os dados de desempenho do edifício [52]. Enumera-se seguidamente algumas utilizações típicas do DesignBuilder [40]:

- Cálculo do impacto de várias opções do design no consumo de energia do edifício;
- Simulação térmica de edifícios com ventilação natural;
- Registando economias na iluminação elétrica com utilização de luz natural;
- Previsão do desempenho solar através de simulações;
- Cálculo de potências para equipamentos de aquecimento e arrefecimento;
- Simulação detalhada de AVAC e sistemas de ventilação natural incluindo o impacto na distribuição de ar, utilizando CFD;
- Análise económica baseada em custos de construção, serviços e custos do ciclo de vida;
- Otimização de design com objetivos múltiplos.

As funções do DesignBuilder [40] estão organizadas por hierarquia. Os dados são herdados do nível acima, ou seja, os dados do bloco são herdados do nível do edifício por sua vez, os dados da zona são herdados dos dados do bloco e os dados da superfície dos dados da zona. Esta disposição permite fazer configurações ao nível do edifício que podem ficar ativas em todo o edifício, ou fazer configurações ao nível do bloco alteram os parâmetros de todas as zonas/superfícies do bloco [52]. (Figura 2.7)

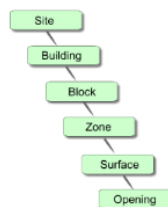


Figura 2.7 Representação da hierarquia dos modelos no DesignBuilder [52]

O Energyplus [39] possui um método de “whole building simulation” em que a modelação é utilizada para analisar o desempenho de um edifício num período específico (por exemplo anual) e calcular cargas de aquecimento/arrefecimento,

considerando aspetos como a utilização e consumos de energia, envolvente do edifício, consumos de água, entre outros, através de balanços de energia e massa entre zonas e elementos. Os outputs deste tipo de simulação focam-se para o desenvolvimento de condições que permitam melhorar o desempenho do edifício considerando que não existem variações de temperatura (nem das condições do ambiente) dentro de uma zona, em cada passo de tempo. Ou seja, a temperatura de zona será calculada através de balanços térmicos interiores (equipamento, pessoas, iluminação, paredes, superfícies envidraçadas, ventilação, etc). Contrariamente, a análise CFD foca-se em áreas específicas, simulando os fluxos de ar/fluido nas zonas, sendo que os modelos de cálculo acabam por ser mais complexos para a previsão do comportamento da movimentação de ar dentro de cada zona. Normalmente utiliza passos de tempo menores do que o “*whole building simulation*” e considera variações nos fluxos e temperaturas de ar em toda a zona. A outra grande suposição nos modelos de balanços térmicos é que as temperaturas das superfícies (paredes, janelas, pavimento e coberturas) possuem temperaturas e irradiação solar uniformes, superfícies radiantes difusas e condução de calor unidirecional [53].

Os cálculos intrínsecos ao “Heating Design” do DesignBuilder [40] são realizados para determinar a capacidade do equipamento de aquecimento, necessário para atender às condições climáticas de inverno mais extremas. Esses cálculos de projeto são tradicionalmente realizados utilizando métodos em regime estacionário e são elaborados a partir do motor de simulação térmica e dinâmica do EnergyPlus.

Os cálculos do “*Heating Design*” não consideram as cargas internas (ocupantes, iluminação e equipamentos) e cargas devido aos ganhos solares. Neste objeto, a perda de calor em estado estacionário será a perda total de calor do edifício. Por outras palavras, será a quantidade de calor necessária para manter a temperatura interior de conforto. Esta análise calcula as capacidades de aquecimento necessárias para manter os setpoints de temperatura em cada zona e exhibe a perda total de calor dividida pelos ganhos/perdas nas superfícies envidraçadas, paredes, divisões, piso, telhado, infiltrações e ventilação natural nos espaços interiores, conforme representado na Equação 2.3 [54].

$$Q_{sensible\ heating} = Q_{glazing} + Q_{walls} + Q_{ceiling} + Q_{ground} + Q_{partitions} + Q_{ext.infiltration} \cdot [W] \quad (2.3)$$

Em que,

$Q_{glazing}$  – Carga térmica devido às superfícies envidraçadas [W];

$Q_{walls}$  – Carga térmica devido às paredes [W];

$Q_{ceiling}$  – Carga térmica devido à cobertura [W];

$Q_{ground}$  – Carga térmica devido ao piso [W];

$Q_{partitions}$  – Carga térmica devido às divisões adjacentes [W];

$Q_{ext.infiltration}$  – Carga térmica devido a infiltrações exteriores [W];

Na simulação, para efeitos de cálculo dos consumos energéticos são considerados todos os ganhos ou perdas no edifício, em cada passo de tempo, incluindo os ganhos internos (ocupação, iluminação e equipamentos), superfícies envidraçadas, divisões, infiltrações, superfícies opacas, contabilizando todas as cargas de calor sensível, incluindo os ganhos solares. No caso da opção/rotina “*simple hvac*”, não são consideradas as curvas de performance dos equipamentos, e os consumos energéticos simples são calculados através das cargas térmicas do Energyplus [39] e as eficiências dos equipamentos, para o tempo de operação definido. O “*detailed hvac*”, em contrapartida, contabiliza as variações na curva de eficiências dos equipamentos, e permite uma otimização à especificidade de cada sistema (incluindo diagramas de ligação entre os vários componentes constituintes da instalação) e oferece uma resposta mais precisa da operação dos equipamentos, no cálculo dos consumos energéticos e do desempenho do edifício.

O Energyplus [39] possui ferramentas de cálculo, utilizando algoritmos matemáticos computacionais, que permitem prever as trocas térmicas dos elementos, zonas e do edifício. Os modelos de simulação do edifício baseiam-se em alguns princípios de equilíbrio térmico e transferência de calor descritos seguidamente.

### **Transferência de calor por Condução**

A taxa de transferência de calor por condução através de um material sólido pode ser descrita pela Lei de Fourier, que estabelece que o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura e à área de superfície, sendo efetuado no sentido das temperaturas menores, ou seja, gradiente térmico negativo, e é dado para o caso unidimensional por:

$$Q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad [W] \quad (2.4)$$

no qual:

$Q_{cond}$  – Quantidade de calor transferido por condução [W];

$k$  – Condutividade térmica do material [W/m.°C];

$A$  – Área de transferência perpendicular ao fluxo [m<sup>2</sup>];

$\frac{dT}{dx}$  - Gradiente de temperatura.

Considerando que o gradiente térmico é constante num sólido,  $\frac{dT}{dx}$  pode ser substituído por  $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ , conforme representado na equação seguinte:

$$Q_{cond} = -k * A * \frac{\Delta T}{\Delta x} . [W] \quad (2.5)$$

Em que:

$\Delta T$  – Diferença de temperatura entre duas superfícies [°C];

$\Delta x$  – Distância do corpo na direção  $x$  [m].

A resistência térmica da parede ( $R_p$ ) é dada por:

$$R_p = \frac{\Delta x}{k * A} . [^{\circ}C.W^{-1}] \quad (2.6)$$

Se a condutividade térmica do material ( $k$ ) for mais elevada, a parede oferece menor resistência à transmissão de calor por condução. Ou seja, quanto maior for  $k$ , menor é a resistência, resultando em menores diferenças de temperatura entre as duas superfícies. Se a condutividade térmica for baixa, significa que o material é um bom isolante. O valor da resistência térmica será superior e existe maior gradiente de temperatura entre as duas superfícies.

### **Transferência de calor por Convecção**

A existência de movimento de um fluido acelera o processo da transferência de calor. Esse processo de transferência pode manifestar-se de duas formas: convecção natural ou forçada. Esta última é causada pela influência externa (por exemplo um ventilador) de ar forçado e a convecção natural é provocada por diferenças de densidade resultantes do próprio aquecimento do fluido. Quando em contacto com um sólido, o fluido em movimento vai receber ou transmitir calor, dependendo da diferença de temperatura entre ambos, provocando um aumento ou redução do seu volume específico, criando assim correntes de convecção. Conhecida como a lei de Newton para o arrefecimento, a taxa de transferência de calor por convecção pode ser representada como:

$$Q_{conv} = h * A_s * (T_s - T_{\infty}) . \quad (2.7)$$

E a resistência térmica de um fluido é dada por:

$$Rf = \frac{1}{h \cdot A_s} \cdot [^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (2.8)$$

Em que,

$Q_{conv}$  – Quantidade de calor transferido por convecção [W];

$A_s$  – Área da superfície perpendicular ao fluxo [m<sup>2</sup>];

$h$  – Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>·°C];

$T_s$  – Temperatura da superfície sólida [°C];

$T_{\infty}$  – Temperatura do fluido [°C].

Os valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção dependem das propriedades físicas do fluido, movimento do fluido e geometria das superfícies onde a permuta vai ocorrer. Se a movimentação do fluido for elevada, o coeficiente de transferência de calor por convecção também será elevado, originando uma baixa resistência à transmissão de calor. Quando a velocidade do fluido tende para zero, a contribuição deste movimento perde significância face ao processo de condução.

### **Transferência de calor por Radiação**

Qualquer corpo com uma temperatura superior a 0K emite radiação térmica. Resulta da emissão e propagação de ondas eletromagnéticas por alteração na configuração a nível molecular dos materiais, incluindo sólidos, líquidos e gases. A transferência de calor por radiação depende da temperatura do corpo e da natureza da superfície, sendo que, não necessita de um material para a sua propagação, sendo mais eficiente no vácuo. Todas as superfícies emitem radiação térmica, e será tanto maior quanto mais elevada for a temperatura. Se um corpo emitir mais energia do que aquela que recebe proveniente das superfícies envolventes, a sua temperatura irá diminuir.

A emissividade ( $\varepsilon$ ) é um parâmetro que define a capacidade de um corpo emitir energia (valores de 0 a 1). Considera-se que, para um corpo negro, a sua emissividade toma o valor de 1, e é considerado um emissor ideal, pois nenhum outro corpo terá maior emissividade.

A lei de Stefan-Boltzmann traduz a quantidade de energia emitida por radiação aplicada a um corpo (Equação 2.9):

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s a^4 \cdot \quad (2.9)$$

no qual,

$E$  – Poder emissivo [ $W/m^2$ ];

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma=5,67 \times 10^{-8}$  [ $W/m^2.K^4$ ]);

$T_{sa}$  – Temperatura absoluta [K];

$\varepsilon$  – Emissividade da superfície [ $m^2$ ].

Todas as superfícies emitem radiação térmica, e será tanto maior quanto mais elevada for a temperatura. Se um corpo emitir mais energia do que aquela que recebe proveniente das superfícies envolventes, a sua temperatura irá diminuir.

### **Coeficiente global de transmissão de calor**

A transferência de calor está relacionada com as propriedades termodinâmicas da envolvente, dos materiais constituintes das paredes (tetos ou pavimento), da área, e do diferencial de temperaturas entre os espaços, conforme mencionado anteriormente. O valor da permuta de calor pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\dot{Q}_{transf} = U * A_s * \Delta T_i . [W] \quad (2.10)$$

Onde,

$U$  – Coeficiente Global de Transferência de Calor [ $W/m^2.^\circ C$ ];

$A_s$  – Área da parede, teto ou pavimento a ser considerada [ $m^2$ ];

$\Delta T_i$  – Diferença de temperatura entre as duas faces da parede, teto ou pavimento ( $^\circ C$ );

$\dot{Q}_{transf}$  – Calor transferido entre os espaços considerados [W].

O coeficiente global de transmissão térmica ( $U$ ) de elementos opacos é dado pelo inverso do somatório das resistências térmicas superficiais e das várias camadas que compõem o elemento, incluindo caixas de ar, representado na Equação 2.11.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} . [W/(m^2.^\circ C)] \quad (2.11)$$

Em que,

$R_j$  – Resistência térmica da camada  $j$  [ $(m^2.^\circ C)/W$ ];

$R_{si}$  – Resistência térmica interior [ $(m^2.^\circ C)/W$ ];

$R_{se}$  – Resistência térmica exterior  $j$  [ $(m^2.^\circ C)/W$ ].

A resistência térmica da camada de um material construtivo traduz a oposição que este oferece à transmissão de calor. A resistência térmica é obtida através da condutibilidade térmica,  $\lambda$  (W/m.°C) e da espessura do material a ser considerado,  $e$  (m) (Equação 2.12):

$$R_j = \frac{e_j}{\lambda_j} \cdot [(m^2 \cdot ^\circ C)/W] \quad (2.12)$$

Em que,

$R_j$  – Resistência térmica da camada  $j$  [(m<sup>2</sup>.°C)/W];

$e_j$  – Espessura da camada  $j$  [m];

$\lambda_j$  – Condutibilidade térmica da camada  $j$  [W/(m.°C)].

No EnergyPlus [39], os ganhos de calor de uma zona consistem em ganhos internos especificados, como troca de ar entre zonas, troca com o ambiente externo e transferência de calor por condução/convecção/radiação das superfícies da zona. Este último, requer cálculos mais complexos porque é necessário um balanço térmico nas superfícies interna e externa de cada parede, piso ou telhado. Além disso, o cálculo transiente de condução de calor no material, entre as superfícies, deve ser resolvido. Esta solução fornece as temperaturas internas e externas e os fluxos de calor que devem ser conhecidos para calcular a componente de convecção para a carga da zona, em cada uma das superfícies da zona. O EnergyPlus [39] utiliza o método de “*Conduction Transfer Function*” (CTF) para resolver o problema da condução transiente para cada superfície. O método resulta numa série temporal de fatores de ponderação que, quando multiplicados pelos valores das temperaturas e fluxos da superfície anterior, e temperaturas interior e exterior atuais da superfície, fornece a taxa de transferência de calor, interno e externo [55].

Numa parede exterior, por exemplo, o balanço térmico em regime estacionário é dado respeitando a seguinte equação:

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (2.13)$$

Sendo que,

$q''_{asol}$  – Transferência de calor devido à radiação solar (direta e difusa);

$q''_{LWR}$  – Transferência de calor devido à radiação da envolvente;

$q''_{conv}$  – Transferência de calor devido às trocas por convecção do ar exterior;

$q''_{ko}$  – Transferência de calor por condução para a parede.

Todos os termos são positivos na transferência de calor da superfície, exceto o termo de condução de calor, que é tradicionalmente considerado positivo na direção de fora para dentro da parede. Cada um destes componentes do equilíbrio térmico são apresentados brevemente na Figura 2.8.

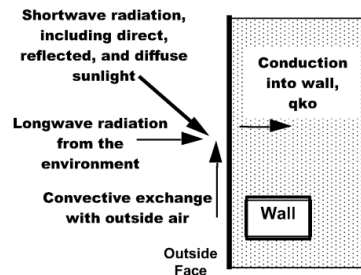


Figura 2.8 Balanço térmico exterior EP [55]

O ponto central do balanço térmico numa zona são as superfícies interiores. Este balanço é geralmente modelado utilizando quatro componentes de transferência de calor acoplados, sendo eles: condução através do elemento de construção, convecção do ar interior, absorção e reflexão de radiação (ver Figura 2.9). A radiação incidente de ondas curtas provém da radiação solar que entra na zona através de janelas e da emissão de fontes internas, como fontes luminosas. O intercâmbio de radiação de ondas longas inclui a absorção e emissão de radiação proveniente de fontes de baixa temperatura, ou seja, outros elementos da zona, como equipamentos e pessoas [55]. O balanço térmico na face interna pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 . \quad (2.14)$$

Sendo que,

$q''_{LWX}$  – Transferência de calor devido a trocas de radiação de onda longa entre superfícies, ou grupo de superfícies, numa zona;

$q''_{SW}$  – Transferência de calor devido à radiação de onda curta;

$q''_{LWS}$  – Transferência de calor devido a radiação de onda longa de equipamentos;

$q''_{ki}$  – Transferência de calor por condução para a parede;

$q''_{sol}$  – Fluxo de radiação solar transmitida, por sua vez absorvida pela superfície;

$q''_{conv}$  – Transferência de calor devido às trocas por convecção do ar interior;

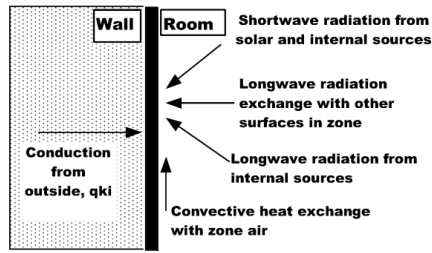


Figura 2.9 Balanço térmico interior EP [55]

## Ganhos solares em edifícios

Os ganhos solares acontecem quando a radiação solar atinge um edifício, seja diretamente através de uma superfície envidraçada ou indiretamente através da estrutura da edificação, incluindo paredes, telhados ou portas, e por sua vez aquece estas superfícies [56].

A radiação solar na superfície da Terra consiste em duas componentes principais: direta e difusa. Enquanto a primeira tem origem nos raios solares que atingem a superfície da Terra sem algum desvio. Além de sua intensidade, também é caracterizada pela direção, que varia com o posicionamento do sol. A radiação solar difusa representa a fração da radiação solar global espalhada pela atmosfera da Terra e seus constituintes [57]. (Figura 2.10)

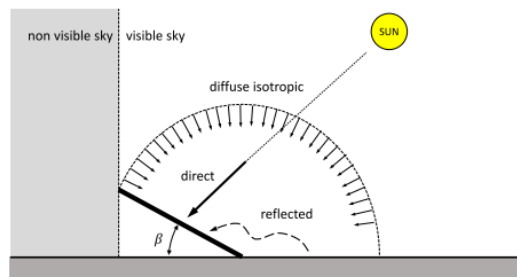


Figura 2.10 Esquema dos vários componentes da radiação solar incidente numa superfície [57]

A localização do edifício em análise é crucial para a determinação do consumo de energia, cargas de aquecimento/arrefecimento, potencial de iluminação natural e uma série de outros cálculos. No EnergyPlus [39], tanto fatores externos (arquivos meteorológicos fornecidos por terceiros) quanto internos (posição solar, perfis de temperatura e humidade para o design day) são utilizados durante as simulações. O objeto de entrada “Site:Location” inclui parâmetros (Latitude, Longitude, Elevação, Fuso Horário) que permitem ao EnergyPlus calcular a posição solar (utilizando Latitude, Longitude e Fuso Horário) para qualquer dia do ano, bem como fornecer a pressão barométrica padrão (através da elevação) [55].

Os arquivos meteorológicos contêm dados horários, ou sub-horários, para cada um dos elementos críticos necessários durante os cálculos (temperatura de bolbo seco, ponto de orvalho, humidade relativa, pressão barométrica, radiação normal direta, radiação horizontal difusa, cobertura total e opaca do céu, direção e velocidade do vento) bem como alguns dados auxiliares como chuva ou neve. O objeto de entrada "SizingPeriod:DesignDay" descreve dias de design (destinados a simular as condições de projeto da ASHRAE, num perfil diário) e o EnergyPlus [39] fornece as porções restantes para completar as condições externas necessárias para execução do programa. Dois outros objetos podem ser também utilizados: SizingPeriod:WeatherFileDays e SizingPeriod:WeatherFileConditionType. O primeiro, especifica um conjunto de dias de arquivos meteorológicos semelhante a um RunPeriod (mas será utilizado para cálculos de dimensionamento). No segundo, as condições extremas, ou típicas, calculadas para o arquivo meteorológico, durante o processamento, podem ser utilizadas [55].

Os valores de informação solar no arquivo meteorológico são valores médios ao longo da hora. Para interpolação de dados meteorológicos horários (ou seja, quando o intervalo de tempo especificado é maior que 1), o valor médio é assumido como sendo o valor no ponto médio da hora. Os valores de saída são totais para cada período de relatório. Portanto, os valores reportados por hora não corresponderão aos valores originais no arquivo meteorológico, mas os totais de informação solar para um dia devem coincidir [55].

Ao avaliar os ganhos de calor em edifícios devido à radiação solar, é necessário quantificar as partes do edifício que se encontram sombreadas e quantas se encontram sob luz solar direta. Como exemplo, a Figura 2.11 representa uma estrutura com telhado plano e uma janela em cada um dos lados visíveis. O sol encontra-se à direita para que as paredes 1 e 3, e as janelas a e c, fiquem completamente sombreadas, e a parede 4 e janela d, completamente iluminadas pelo sol. A parede 2 e a janela b estão parcialmente sombreadas. A área iluminada pelo sol de cada a superfície muda consoante a posição do sol durante o dia. O objetivo dos algoritmos de sombreamento do EnergyPlus [39] é calcular essas áreas iluminadas pelo sol. Os conceitos do sombreamento intrínsecos ao EnergyPlus [39] incluem algoritmos de sombreamento BLAST e TARP [55].

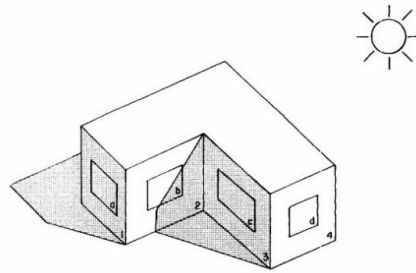


Figura 2.11 Representação geral de esquema de sombreamento EP [55]

Os cálculos de sombreamento exigem que as superfícies do edifício sejam descritas geometricamente. Tal é elaborado pelas coordenadas de seus vértices, num sistema de coordenadas cartesianas tridimensional. O ângulo de azimute de uma superfície é o ângulo do eixo norte à projeção no plano XY de uma normal à superfície (sentido horário). O ângulo de inclinação da superfície é o ângulo entre o eixo Z e a normal à superfície [55]. (Figura 2.12)

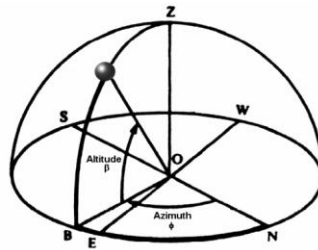


Figura 2.12 Ilustração da posição solar [55]

### 2.3. Caso de estudo – Localização, envolvente e materiais

A habitação em que o presente estudo se incide tem tipologia T2, uma área útil de 90m<sup>2</sup>, pé direito de 2,7m e é constituída por dois quartos, uma cozinha, uma casa de banho e uma sala de estar (Figura 2.13 e Tabela 2.4). Tendo sofrido uma pequena ampliação pouco depois da sua primeira construção, no ano de 1998, a cozinha, o sótão e a garagem não serão espaços climatizados e a fachada principal está orientada a Este (Nascente).

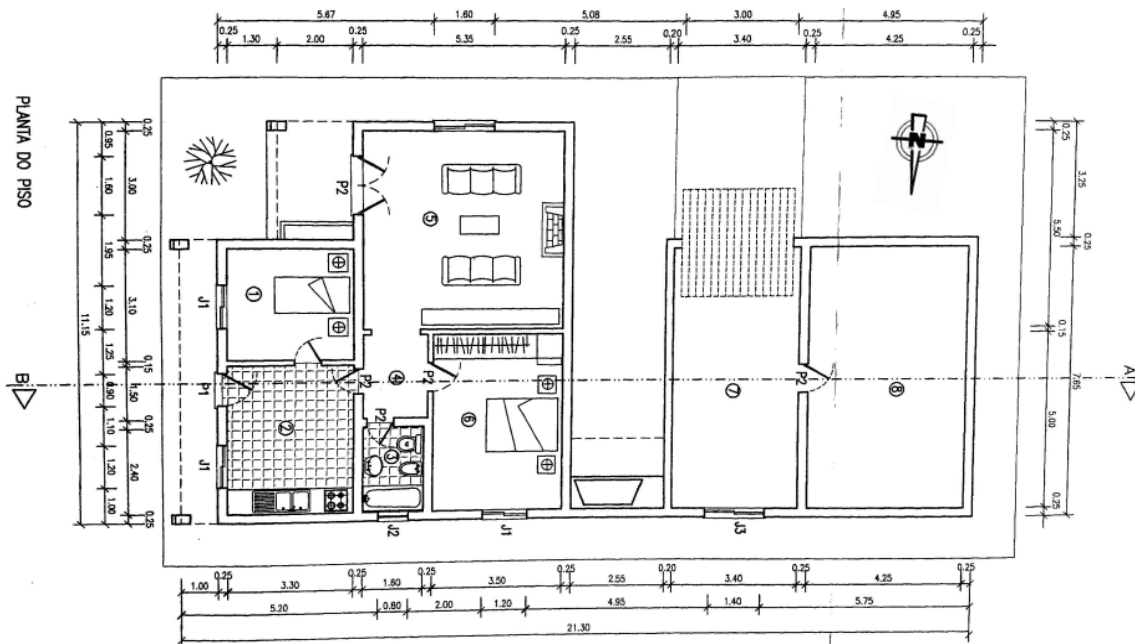


Figura 2.13 Planta da habitação em estudo

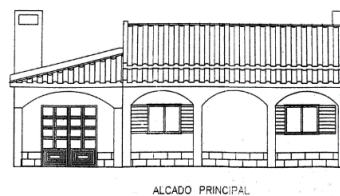


Figura 2.14 Alçado principal da habitação em estudo

Tal como maior parte das habitações da época, em Portugal, os materiais de construção, nomeadamente na qualidade de materiais e espessuras de parede, tornam-se insuficientes para operar um eficaz isolamento térmico. Dessa forma, este estudo será baseado na construção real, o que não implica que possam vir a existir propostas que enquadrem materiais com comportamentos térmicos mais adequados para efeitos de estudo comportamental energético, económico e ambiental para o aquecimento da habitação.

Tabela 2.4 Identificação das diferentes zonas da habitação

Nr.	Designação	Área [m <sup>2</sup> ]
1	Cozinha	13.86
2	Sala + hall	31.27
4	Quarto 1	10.23
5	Quarto 2	19.6
6	Casa de banho	4.75

Seguidamente, na Figura 2.15, estão apresentadas as estatísticas climáticas incluindo temperaturas médias das duas estações do ano para o local em estudo e a

zona climática (incluindo altitude, longitude e latitude), obtidas do conjunto de dados disponibilizados pela Direção Geral da Energia e Geologia [58].

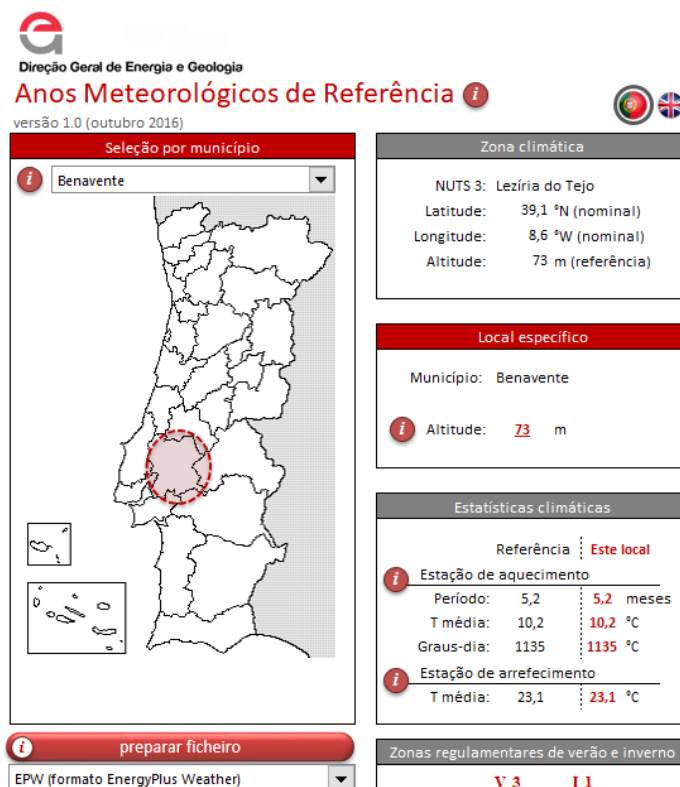


Figura 2.15 Dados meteorológicos para a localização da habitação em estudo retiradas do software de cálculo da DGEG "SCE.CLIMA" [58]

A irradiação solar, naturalmente, toma maiores valores durante o verão, pelo que as capacidades de sistemas solares, tornam-se mais elevadas no verão, quando as necessidades de aquecimento e água quente, é bastante menor. Encontram-se seguidamente gráficos com médias anuais de alguns dados meteorológicos, como sejam: Temperaturas mensais (Figura 2.16), Irradiação solar mensal (Figura 2.17) e Humidade relativa média mensal (Figura 2.18).

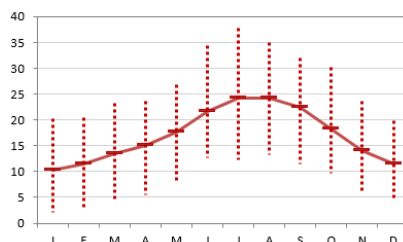


Figura 2.16 Temperaturas mensais: média, mínimo e máximos absolutos [°C] [58]

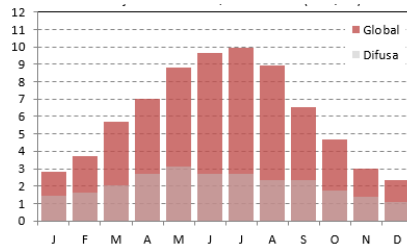


Figura 2.17 Irradiação solar mensal, média diária [kWh/m²] [58]

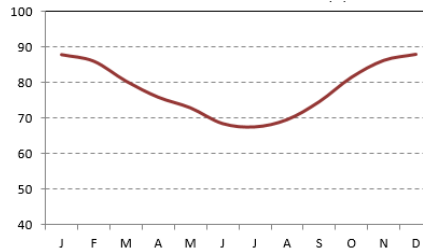


Figura 2.18 Humidade relativa média mensal [%][58]

Pese embora, na Figura 2.19, se encontrarem descritos valores para a temperatura, irradiação solar, humidade relativa e intensidade do vento para os diferentes meses do ano, o estudo vai incidir apenas para a estação de aquecimento (5 meses: novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	10,2	11,5	13,5	15,0	17,7	21,5	24,1	24,2	22,5	18,2	14,1	11,5
min T	2,1	2,6	4,6	5,4	8,3	12,6	12,3	13,3	11,5	9,6	6,1	4,4
max T	20,2	20,4	23,2	23,7	26,8	34,4	37,7	34,9	32,0	30,2	23,6	19,9
G	2,8	3,7	5,7	7,0	8,8	9,7	10,0	9,0	6,5	4,7	3,0	2,3
D	1,4	1,6	2,0	2,7	3,1	2,7	2,7	2,3	2,4	1,7	1,4	1,1
U	88	86	80	76	73	69	68	70	75	82	86	88
v	2,4	2,5	2,9	2,7	2,8	2,7	3,3	2,8	2,4	2,1	2,2	2,4

Figura 2.19 Temperaturas (T), Irradiação solar global (G) e difusa (D), Humidade relativa (U) e intensidade do vento (v) [58]

Tendo sido construída nos anos 90, a habitação possui escassez de isolamento, sendo caracterizada por paredes e envidraçados simples e de baixas espessuras. Sendo esse é um dos fatores que mais pesa na baixa eficiência energética que, se infere, venha a caracterizar a construção. O que pode ser um ponto de estudo, sendo que na prática, alterar isolamentos e elementos estruturais pode vir a ser um grande investimento e ter um longo período de retorno.

Os valores das resistências térmicas superficiais não serão considerados no cálculo do coeficiente de transmissão de calor uma vez que o software possibilita a utilização dos coeficientes de convecção interior e exterior através de algoritmos que consideram variação de temperatura e propriedades do ar (como os modelos TARP [59] e DOE-2 [60]). O algoritmo TARP [59] (convecção interior) divide-se por dois componentes, sendo eles forçado e natural, representados na Equação 2.15 [55].

$$h_{ce} = h_f + h_n \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2.15)$$

Em que,

$h_{ce}$  – Coeficiente de convecção exterior na superfície [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ];

$h_f$  – Coeficiente de convecção forçada na superfície [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ];

$h_n$  – Coeficiente de convecção natural na superfície [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ].

A componente da convecção forçada dado por:

$$h_f = 2,537 \cdot W_f \cdot R_f \cdot \left(\frac{P \cdot V_z}{A}\right)^{1/2} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2.16)$$

Em que,

$W_f$  – Coeficiente da direção do vento (1 para superfícies a barlavento e 0.5 para superfícies a sotavento);

$R_f$  – Coeficiente de rugosidade da superfície;

$V_z$  – Velocidade do vento calculada no centro de massa da superfície [ $\text{m/s}$ ];

$P$  – Perímetro da superfície [ $\text{m}$ ];

$A$  – Área da superfície [ $\text{m}^2$ ].

A componente natural correlaciona o coeficiente de convecção à orientação da superfície e à diferença entre as temperaturas da zona e da superfície.

Para uma superfície vertical:

$$h_n = 1,31 \cdot |\Delta T|^{1/3} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2.17)$$

Para superfície horizontal instável (quando a tendência natural aumenta o fluxo do ar quente para subir e do ar frio a descer, afastando-se da superfície):

$$h_n = \frac{9,482 \cdot |\Delta T|^{1/3}}{7,283 - |\cos \Sigma|} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2.18)$$

Para superfície horizontal estável (quando a tendência natural reduz o fluxo do ar quente para subir e do ar frio a descer, aproximando-se da superfície):

$$h_n = \frac{1,810 \cdot |\Delta T|^{1/3}}{1,382 + |\cos \Sigma|} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2.19)$$

Em que,

$\Delta T$  – Diferença entre a temperatura do ar e da superfície;

$\Sigma$  - Ângulo de inclinação da superfície.

O algoritmo DOE-2 calcula o coeficiente de convecção exterior, e é dado por:

$$h_c = h_n + R_f(h_{c,s} - h_n) \cdot [W/m^2K] \quad (2.20)$$

Em que,

$h_{c,s}$  é o coeficiente de convecção em superfícies pouco rugosas, e pode ser calculado como:

$$h_c = \sqrt{h_n^2 + [a \cdot V_z^b]^2} \cdot [W/m^2K] \quad (2.21)$$

Sendo a e b constantes de MoWiTT [61] que dependem da direção do vento e do escoamento de ar. O algoritmo DOE-2 [60] considera o efeito da convecção com mais precisão para superfícies com rugosidades mais elevadas. O coeficiente de convecção natural é calculado da mesma forma que no modelo TARP [59], mencionado anteriormente [63].

Encontra-se representado nas tabelas seguintes (2.5 a 2.8) os elementos construtivos da habitação, e coeficientes de transmissão de calor calculados utilizando a Equação 2.11 (excluindo os termos para as resistências térmicas superficiais).

Tabela 2.5 Coeficiente de transferência de calor parede exterior 25cm (Laboratório Nacional de Engenharia Civil [62])

Parede 25 (alvenaria)				
Elemento de Camada	e (m)	$\lambda$ (W/m.K)	R (m <sup>2</sup> .K/W)	U (W/m <sup>2</sup> .K)
Estuque Tradicional	0,010	0,50	0,020	1.613
Alvenaria de Tijolo Cerâmico	0,220		0,580	
Estuque Tradicional	0,010	0,50	0,020	

Tabela 2.6 Coeficiente de transferência de calor parede interior 15cm (Laboratório Nacional de Engenharia Civil [62])

Parede 15 (alvenaria)				
Elemento de Camada	e (m)	$\lambda$ (W/m.K)	R (m <sup>2</sup> .K/W)	U (W/m <sup>2</sup> .K)
Estuque Tradicional	0,010	0,50	0,020	2.174
Alvenaria de Tijolo Cerâmico	0,150		0,420	
Estuque Tradicional	0,010	0,50	0,020	

Tabela 2.7 Coeficiente de transferência de calor pavimento (Laboratório Nacional de Engenharia Civil [62])

Pavimento				
Elemento de Camada	e (m)	$\lambda$ (W/m.K)	R (m <sup>2</sup> .K/W)	U (W/m <sup>2</sup> .K)
Revestimento cerâmico	0,010	1,15	0,009	2.546
Camada de Regularização em Betão Celular	0,100	1,50	0,067	
Tela de Impermeabilização em Betume	0,050	0,23	0,217	
Laje em Betão Armado	0,200	2,00	0,100	

Tabela 2.8 Coeficiente de transferência de calor cobertura exterior (Laboratório Nacional de Engenharia Civil [62])

Cobertura				
Elemento de Camada	e (m)	$\lambda$ (W/m.K)	R (m <sup>2</sup> .K/W)	U (W/m <sup>2</sup> .K)
Estuque Tradicional	0,010	0,50	0,020	7.143
Laje em Betão Armado	0,200	2,00	0,100	
Estuque Tradicional	0,010	0,50	0,020	

Utilizou-se o software de cálculo Rph - Método Simplificado, Aplicação LNEC para ventilação no âmbito do REH e RECS, v2.0a de 2014, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil [63], para determinação das renovações devido às infiltrações de ar, por ventilação natural da habitação em estudo. Este método consiste num conjunto de simplificações e adaptações do método previsto na Norma EN 15242 e calcula a soma dos caudais de ar no edifício nomeadamente através das janelas, caixas de estore, aberturas, condutas e ar escoado através dos ventiladores.

Caso existam condutas de ventilação natural, quer de admissão quer de exaustão, o seu impacto nos caudais totais deve ser devidamente contabilizado tomando em consideração as respetivas perdas de carga associadas, conforme Equação 2.22:

$$q_{v,conduta} = C \cdot \Delta P^{0.5} \cdot [m^3/h] \quad (2.22)$$

Em que:

$q_{v,conduta}$  – Caudal de ar através da conduta [m<sup>3</sup>/h];

C – Constante da curva característica de condutas de ventilação natural [m<sup>3</sup>/h a 1 Pa];

$\Delta P$  – Diferença de pressão [Pa]

A determinação da constante da curva característica pode ser realizada através de ensaios e cálculos das perdas de carga nas condutas ou, alternativamente, segundo o Manual SCE [21], através de uma aproximação, considerando a relação entre a área total e a área livre da conduta.

Nos casos em que não exista a realização do ensaio de pressurização, considera-se que as principais infiltrações ocorrem na caixilharia exterior e nas eventuais caixas de estore. Para cada janela, a estimativa das infiltrações deve ser realizada como:

$$q_{v,janela} = W \cdot \left(\frac{\Delta P}{100}\right)^{0.67} \cdot A_w \cdot [m^3/h] \quad (2.23)$$

Sendo:

$q_{v,janela}$  – Caudal de ar devido à permeabilidade ao ar da janela [ $m^3/h$ ];

$W$  – Coeficiente de classe de permeabilidade ao ar [ $m^3/(h.m^2)$ ];

$\Delta P$  – Diferença de pressão [Pa]

$A_w$  – Área do vão envidraçado [ $m^2$ ]

O caudal de ar de infiltrações pela caixa de estore deve ser obtido através das Equações 2.24 e 2.25, dependendo da sua permeabilidade ao ar:

$$q_{v,caixa\ de\ estore,\ baixa} = 1 \cdot \left(\frac{\Delta P}{100}\right)^{0.67} \cdot 0,7 \cdot A_w \cdot [m^3/h] \quad (2.24)$$

$$q_{v,caixa\ de\ estore,\ baixa} = 10 \cdot \left(\frac{\Delta P}{100}\right)^{0.50} \cdot 0,7 \cdot A_w \cdot [m^3/h] \quad (2.25)$$

Em que,

$q_{v,caixa\ de\ estore,\ baixa}$  - Caudal de ar pela caixa de estore com permeabilidade ao ar baixa [ $m^3/h$ ]

$q_{v,caixa\ de\ estore,\ elevada}$  - Caudal de ar pela caixa de estore com permeabilidade ao ar elevada [ $m^3/h$ ]

O caudal de ar através das aberturas para ventilação deve ser determinado em função do seu tipo, conforme representado pelas equações seguintes:

Abertura de secção fixa

$$q_{v,abertura} = 0,281 \cdot A_l \cdot \Delta P^{0,5} \cdot [m^3/h] \quad (2.26)$$

Abertura autorregulável ( $\Delta P \leq x$ )

$$q_{v,abertura} = Q \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{x}} \quad [m^3/h] \quad (2.27)$$

Abertura autorregulável ( $\Delta P > x$ )

$$q_{v,abertura} = Q \cdot \left(1 + 0,5 \cdot \frac{\Delta P - x}{100 - x}\right) \quad [m^3/h] \quad (2.28)$$

Em que:

$q_{v,abertura}$  – Caudal de ar através da abertura para ventilação [ $m^3/h$ ];

$A_l$  – Área livre de abertura para ventilação [ $cm^2$ ];

$\Delta P$  – Diferença de pressão [Pa];

$Q$  – Caudal nominal da grelha [ $m^3/h$ ];

$x$  – Pressão de funcionamento da grelha autorregulável [Pa].

A diferença de pressão pode ser calculada como:

$$\Delta P = -\rho \cdot g \cdot Hi \cdot \left(1 - \frac{273,15 + \theta_{ext,i}}{273,15 + \theta_{ref,i}}\right) \quad [Pa] \quad (2.29)$$

Em que:

$\Delta P$  – Diferença de pressão [Pa];

$\rho$  – Massa volúmica do ar exterior (1,22 a 283,15K) [ $kg/m^3$ ];

$g$  – Aceleração da gravidade (9,8) [ $m/s^2$ ];

$Hi$  – Diferença de cotas entre aberturas [m];

$\theta_{ext,i}$  – Temperatura exterior média do mês mais frio da estação de aquecimento [ $^{\circ}C$ ];

$\theta_{ref,i}$  – Temperatura interior de referência na estação de aquecimento (18) [ $^{\circ}C$ ];

A taxa de renovação de ar ( $Rph$ ), irá corresponder à soma dos caudais de ar no edifício a dividir pelo volume interior útil do edifício.

A análise dos modelos numéricos intrínsecos aos softwares de simulação dinâmica revela-se essencial, permitindo a compreensão dos vetores que terão impacto nos resultados e desempenho do edifício simulado. Tal como as equações que governam os processos de transferência de calor, utilizadas nos modelos matemáticos, revelam ser

de grande importância para a compreensão dos mesmos. Neste capítulo foram enumeradas algumas dessas variáveis de maior importância para a análise computacional do caso de estudo apresentado anteriormente, sendo que a modelação e simulações energéticas encontrar-se-ão nos seguintes capítulos. A definição dos *inputs* relativos ao software de simulação energética deve ser elaborada tendo em conta estes fatores e a sua relação com o impacto nos *outputs*.

## 3. Modelação e simulação computacional

### 3.1. Caracterização do sistema

É possível a importação de um perfil para simulação dinâmica em formato *EnergyPlus Weather* (EPW) através do software de cálculo “Anos Meteorológicos de Referência para Simulação Dinâmica” da DGEG [58] mencionado anteriormente. Este resulta num formato de ficheiro que possa ser importado, posteriormente, pelo DesignBuilder [40], e trabalhar com os fatores meteorológicos do local, sendo que o estudo vai ser focado na estação de aquecimento.

Dessa forma, foram introduzidos os dados referentes à localização (*menu location, site level*) conforme demonstra a Figura 3.1, tal como a importação do ficheiro EPW (PRT\_BENAVENTE\_DGEG) [52].

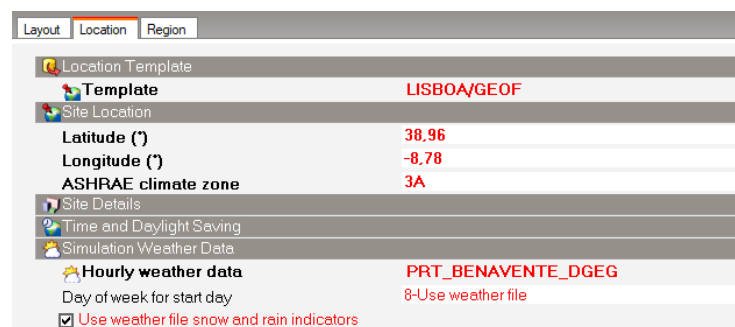


Figura 3.1 Separador “location”, DesignBuilder

“*Component blocks*” são componentes utilizados pelo DesignBuilder [40] para modelar e tratar estruturas como superfícies de sombreamento para as simulações. Estes componentes não absorvem nem transmitem calor, e o seu efeito nas simulações está relacionado apenas com o sombreamento e reflexão da radiação e luz solar. Os dispositivos de sombreamento e respetivos pilares foram selecionados como tais

estruturas, conforme representado na Figura 3.2 (a rosa). A garagem não vai ser objeto de estudo pois não será climatizada, mas situa-se junto a fachada virada para oeste.

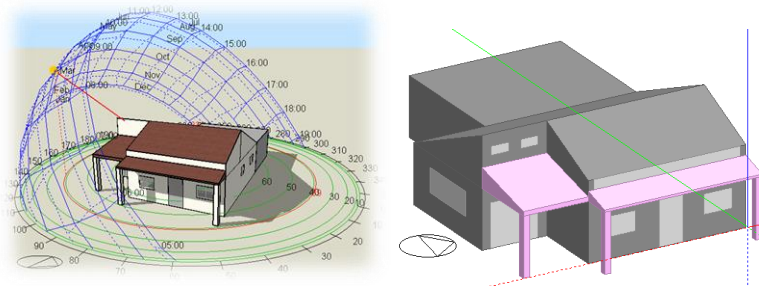


Figura 3.2 Vistas 3D do modelo da habitação em estudo

Foram adicionados o edifício e diferentes zonas representadas na Figura 3.3. A estrutura de dados começa por identificar o edifício e segue progressivamente até aos elementos construtivos e às aberturas das zonas térmicas. Por defeito, todas as zonas são incluídas em simulações e cálculos de projeto de aquecimento e arrefecimento, mas algumas zonas podem ser excluídas. O telhado, representado por sótão1 e sótão2, representa uma zona não ocupada e não climatizada situando-se fora da envolvente principal do edifício. Este tipo de caracterização é normalmente utilizada em telhados, estacionamentos, etc, e são considerados para os feitos de simulação. Na modelação e consequente quantificação dos caudais de ventilação natural, a exclusão de zonas tem significado, pois estas podem desempenhar um papel importante nas transferências de massa de uma parte do edifício para outra e, portanto, podem ter um efeito significativo na ventilação natural nas zonas incluídas [52].

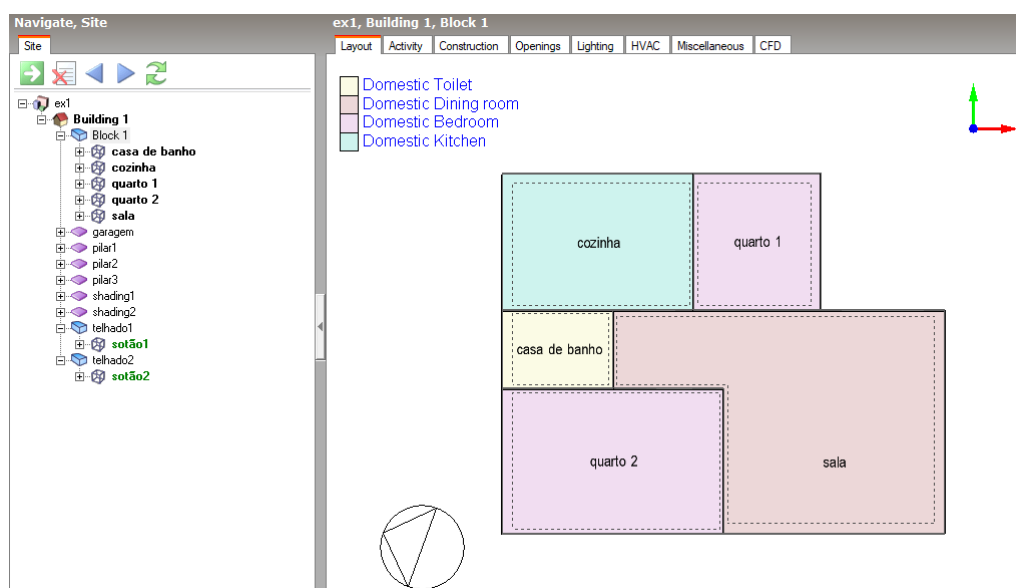


Figura 3.3 Estrutura hierarquizada de dados do lado esquerdo e a representação gráfica do lado direito

## Atividade – “Activity tab”

Neste menu é possível identificar em cada zona qual o tipo de espaço, definindo a ocupação, utilização de alguns equipamentos como computadores ou equipamentos de cozinha, *setpoints* de aquecimento e arrefecimento, utilização de AQS e perfis horários.

Utilizou-se primeiramente os *templates* já existentes no DesignBuilder [40] para definição das diferentes zonas, sendo que foram adaptadas as informações específicas ao sistema e à habitação. Na Figura 3.4 é apresentado um exemplo para cozinha (“*domestic kitchen*”). Neste caso, optou-se por considerar uma taxa de ocupação de 0.2 ocupantes/m<sup>2</sup> - correspondendo a 3 ocupantes em simultâneo - que pode variar conforme o perfil horário definido para o espaço em questão. Também os fatores para a atividade metabólica podem ser estabelecidos, para a zona em questão, podendo esta variar de 1.00, para homem, 0.85 para mulher ou 0.75 para criança, tendo-se adotado um valor médio de 0.9 entre homem e mulher. O software permite a utilização de valores pré-definidos para as diferentes taxas metabólicas (1 met = 58,1W/m<sup>2</sup>), dependendo do tipo de atividade, bem como a utilização dos fatores respetivos, derivados da *ASHRAE Fundamentals 2021* [64].

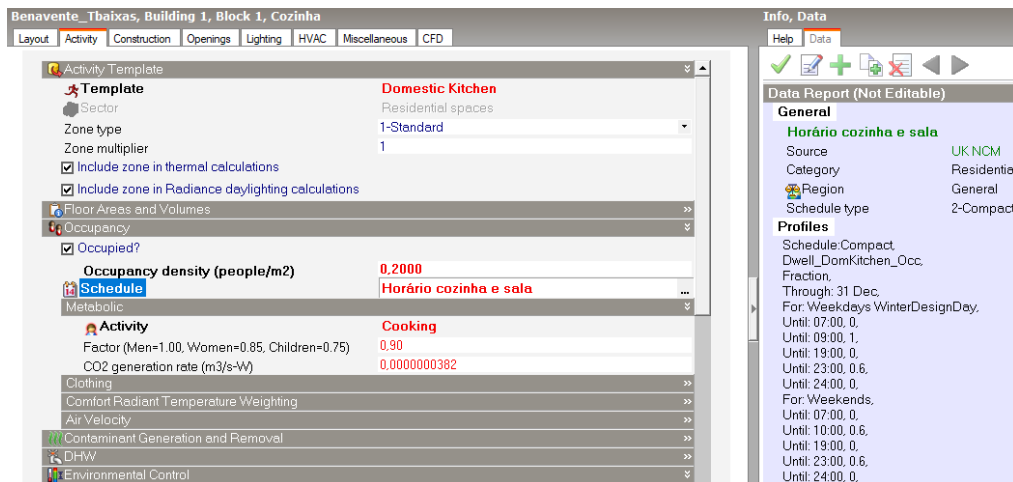


Figura 3.4 Menu “Activity” para a cozinha

Repare-se ainda na figura anterior, o perfil horário do espaço (à direita) em formato compacto. Tomando o exemplo para a cozinha “For: Weekdays. Until: 07.00, 0” significa que a ocupação é zero até essa hora. “Until: 09.00, 1” significa ocupação máxima (neste caso 3 ocupantes) desde as 7h até as 9h. Seguidamente até as 19h não existe qualquer ocupação, e até as 23h o espaço encontra-se com 60% da ocupação máxima. Na Figura 3.5 é possível observar os perfis das diferentes zonas da habitação, elaborados a partir do software de cálculo Qventila do LNEC [65], para determinação dos caudais mínimos de ar novo.

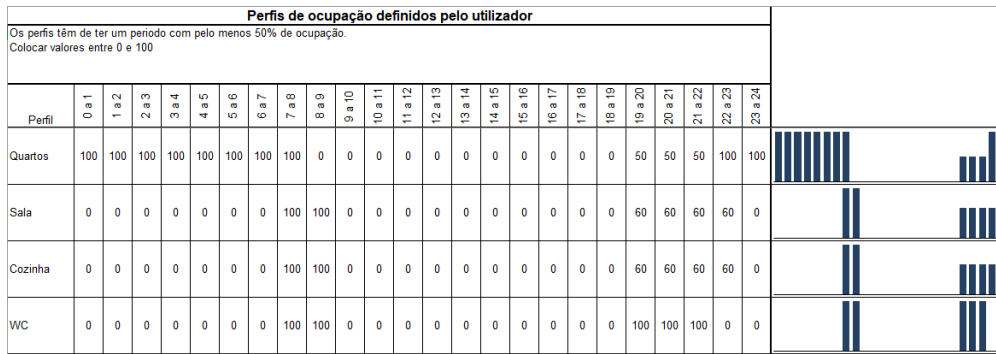


Figura 3.5 Perfis horários para as diferentes divisões (dias de semana)

Os perfis horários para os equipamentos elétricos associados ao espaço (“Miscellaneous” e “Catering”) seguirão a ocupação dos mesmos, tal como a iluminação. Numa fase inicial esses equipamentos entrarão para o cálculo dos ganhos internos do modelo, sendo que os equipamentos de climatização e AQS serão focados posteriormente.

### Construção, aberturas e iluminação – “Construction tab, openings tab e lighting tab”

O menu construção permite a definição dos materiais da envolvente da habitação, nomeadamente paredes interiores e exteriores, piso e cobertura/telhado. Utilizou-se novamente a hierarquia de utilização do DesignBuilder [40], definindo-se todos os elementos necessários respeitando a Figura 3.6 e os materiais definidos anteriormente.

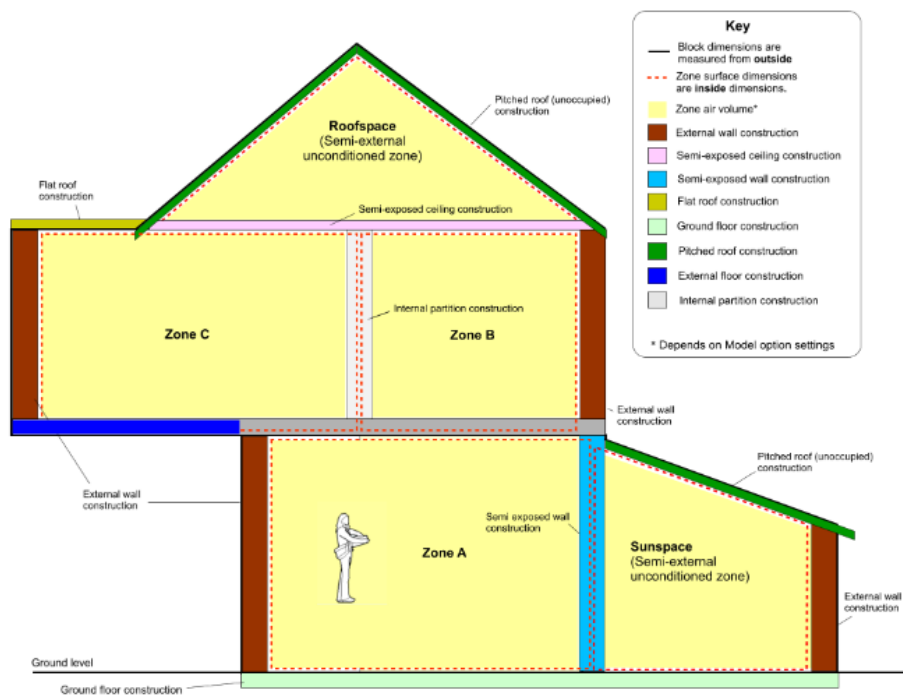


Figura 3.6 Diferentes elementos de construção DesignBuilder [52]

Na Figura 3.7 está representado um exemplo para as paredes exteriores definidas no modelo. Foram utilizados os valores calculados dos coeficientes de transmissão de calor apresentados nas Tabelas 2.5 a 2.8 do Capítulo 2. Note-se que os elementos construtivos são extremamente simples e sem isolamento, o que acaba por se tornar interessante para estudo a alteração destes elementos, nomeadamente adicionar isolamentos às paredes e considerar superfícies envidraçadas de melhor qualidade.

Constructions		Constructions	
Layers	Surface properties	Image	Calculated
<b>General</b>			
Name	Parede exterior 25		
Source	DesignBuilder		
Category	Walls		
Region	General		
Colour			
<b>Definition</b>			
Definition method	1-Layers		
<b>Calculation Settings</b>			
<b>Layers</b>			
Number of layers	3		
<b>Outermost layer</b>			
Material	Estuque		
Thickness (not used in thermal calcs) (m)	0.0100		
<b>Layer 2</b>			
Material	Tijolo 22		
Thickness (not used in thermal calcs) (m)	0.2200		
<b>Innermost layer</b>			
Material	Estuque		
Thickness (not used in thermal calcs) (m)	0.0100		
<b>Inner surface</b>			
Convective heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> ·K)	2.152		
Radiative heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> ·K)	5.540		
Surface resistance (m <sup>2</sup> ·K/W)	0.130		
<b>Outer surface</b>			
Convective heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> ·K)	19.870		
Radiative heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> ·K)	5.130		
Surface resistance (m <sup>2</sup> ·K/W)	0.040		
<b>No Bridging</b>			
U-Value surface to surface (W/m <sup>2</sup> ·K)	1.613		
R-Value (m <sup>2</sup> ·K/W)	0.790		
<b>U-Value (W/m<sup>2</sup>·K)</b>	<b>1.266</b>		
<b>With Bridging (BS EN ISO 6946)</b>			
Thickness (m)	0.2400		
Km - Internal heat capacity (K·J/m <sup>2</sup> ·K)	0.0000		
Upper resistance limit (m <sup>2</sup> ·K/W)	0.790		
Lower resistance limit (m <sup>2</sup> ·K/W)	0.790		
U-Value surface to surface (W/m <sup>2</sup> ·K)	1.613		
R-Value (m <sup>2</sup> ·K/W)	0.790		
<b>U-Value (W/m<sup>2</sup>·K)</b>	<b>1.266</b>		

Figura 3.7 Coeficiente de transferência de calor calculado para a parede exterior DesignBuilder

O software permite a utilização de alguns algoritmos diferentes para o cálculo da convecção numa superfície (“surface convection”). Foi utilizada a opção “TARP” para cálculo da convecção no EnergyPlus entre zonas interiores. Este algoritmo é baseado em convecção natural variável com base na diferença de temperatura. Para a convecção exterior foi utilizado o modelo “DOE-2” que é uma combinação de outros modelos detalhados. São ambos utilizados como modelos padrão no software [60]. Em Abba, H. Y, et al. (2022) [44] foram comparados e validados os resultados obtidos em campo e simulados pelo software, utilizando os algoritmos em questão, resultando em desvios inferiores a 10%. Nos testes comparativos entre os resultados obtidos pelo DesignBuilder [40] e por outros softwares de simulação, foram utilizados os mesmos algoritmos para a validação com a ASHRAE 140-2017 [46], [66] [67]. (Figura 3.8)

A permeabilidade ou estanquicidade “Airtightness” do modelo pode ser definida como constante, quando selecionado “Scheduled *natural ventilation*”, podendo variar ao longo do tempo conforme um perfil horário definido. Também é possível utilizar “*Calculated natural ventilation*” em que a permeabilidade pode ser definida especificamente ou segundo 5 níveis “crack template”. Estes valores apenas terão efeito quando for selecionada a opção para ventilação natural, em que a taxa de ventilação é calculada pela flutuabilidade da pressão do vento, tamanho e operação das aberturas. Não obstante ser possível tirar partido desta opção, considerando não existirem sistemas de ventilação natural na habitação, optou-se pela modelação baseada no

“Airtightness”. Na Figura 3.8 encontra-se o valor de renovações horárias utilizadas calculado a partir do software de cálculo Rph do LNEC [63] referenciado anteriormente.

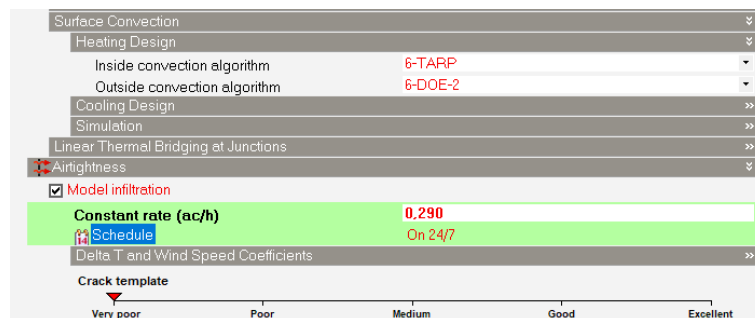


Figura 3.8 Convecção e permeabilidade para o modelo da habitação no DesignBuilder

As janelas e as portas foram definidas pela geometria e material (Vidro de 3mm simples, portas exteriores de alumínio e interiores de madeira). O vidro selecionado no software tem um fator solar SHGC de 0.861 e um coeficiente de transmissão de calor de 5.894 W/m<sup>2</sup>.K, visto serem estas as propriedades que mais se aproximam dos equipamentos instalados. Para iluminação geral foram definidas pequenas lâmpadas led de 5W para os quartos e casa de banho, e de 2x10W para a cozinha e sala, tendo-se aqui seguido estratégia idêntica à adotada para os vidros existentes, isto é, tentou-se aproximar ao máximo possível as características tipificadas no software ao existente no protótipo. (Figuras 3.9 e 3.10)



Figura 3.9 Superfície envidraçada simples 3mm, cozinha DesignBuilder

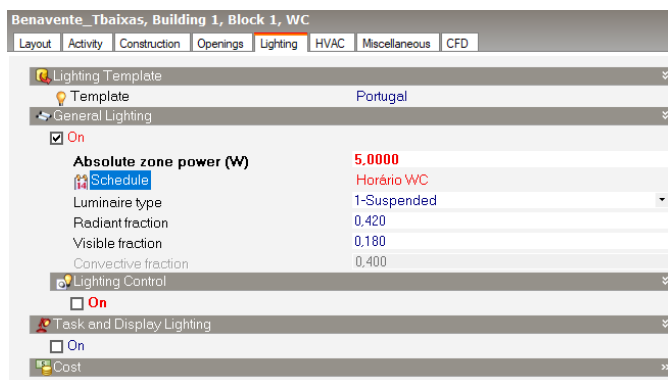


Figura 3.10 Iluminação WC DesignBuilder

## 3.2. Situação inicial e curva de carga do sistema (Estação de aquecimento)

Foi elaborada uma simulação relativa à situação inicial para o dia 16 de janeiro, onde foi encontrada a temperatura mínima atingida durante os meses em estudo, com o objetivo de verificar as condições de conforto da habitação, na estação de inverno, com especial enfoque nas temperaturas interiores.

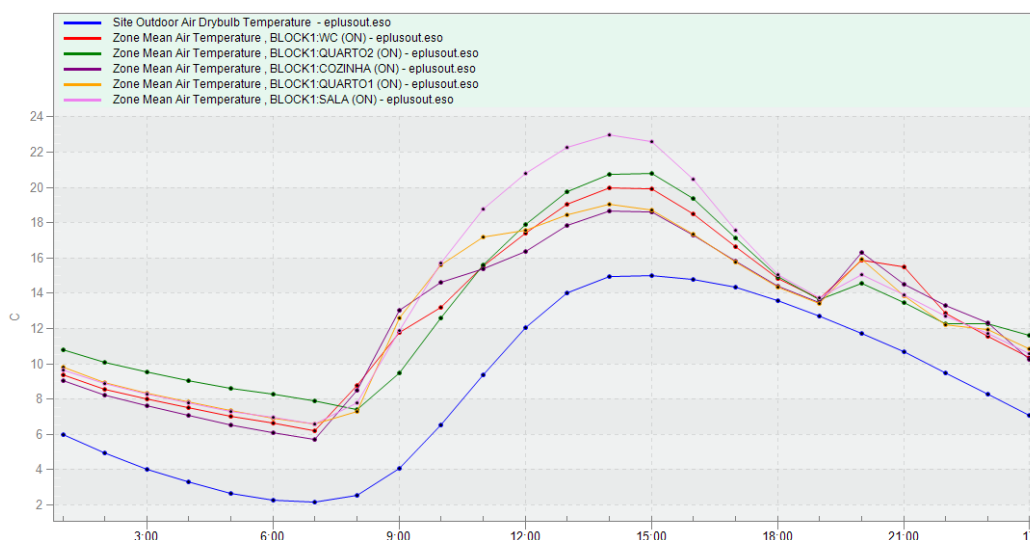


Figura 3.11 Temperatura exterior e interior para as diferentes zonas, situação inicial

Observando a Figura 3.11, é possível verificar que durante o dia simulado, apenas das 12h00 até as 17h00 (período em que não existe ocupação), as temperaturas dos quartos atingem valores dentro da gama de conforto definida em Wang R. et al. [68], sendo evidente, no restante período, as muito baixas temperaturas preconizadas pelo modelo. Nos momentos em que existe ocupação, as temperaturas interiores encontram-se abaixo dos 12°C (com exceção de um aumento que acontece às 20h devido ao peso das cargas internas dos ocupantes e equipamentos, originarem alguns ganhos de calor no interior das zonas, voltando a decrescer nas horas seguintes). As temperaturas interiores resultantes, no período das 12h00 às 17h00, também derivam dos elevados valores de radiação que acontecem nesses intervalos, importados do ficheiro meteorológico EPW. Apesar das baixas temperaturas exteriores durante o mês de janeiro, particularmente durante a noite, os níveis de radiação direta incidente no local, durante o dia, tomam valores consideráveis (587 W/m<sup>2</sup> às 12h00), tendo influência nas temperaturas interiores (Figura 3.12). A divisão da sala possui uma superfície envidraçada na fachada voltada para sul, o que faz alavancar este impacto nas temperaturas interiores, especialmente nesta divisão.

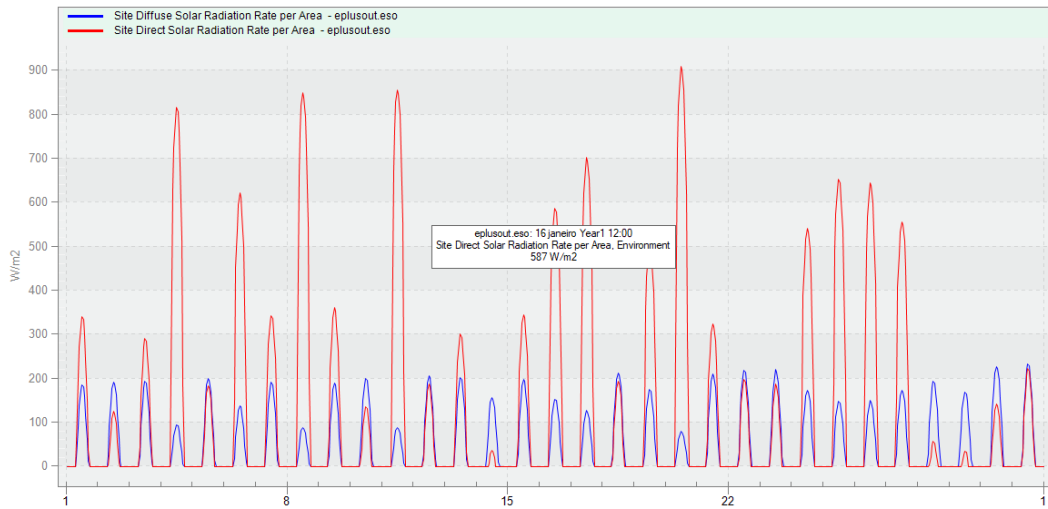


Figura 3.12 Radiação direta e difusa (dia 16 de janeiro)

Procedendo à determinação da curva de carga da habitação, é sempre interessante trabalhar na redução da mesma, através de métodos de aproveitamento e eficiência energética da habitação, bem como a seleção dos equipamentos de aquecimento e materiais construtivos que melhor possam satisfazer as necessidades do edifício e dos ocupantes.

Numa primeira análise, para a situação inicial, será determinada a potência necessária a contabilizar as cargas térmicas que se preconiza sejam necessárias para repor as condições mínimas de conforto nos vários espaços com ocupação humana (a cozinha, sótão e garagem não possuem climatização). A Figura 3.13 tem representada a curva de carga ao longo do mês onde ocorre o pico de potência máxima, utilizando set-points de temperatura interior de  $18^{\circ}C$  (valor segundo o Manual SCE [21] para a estação de aquecimento).

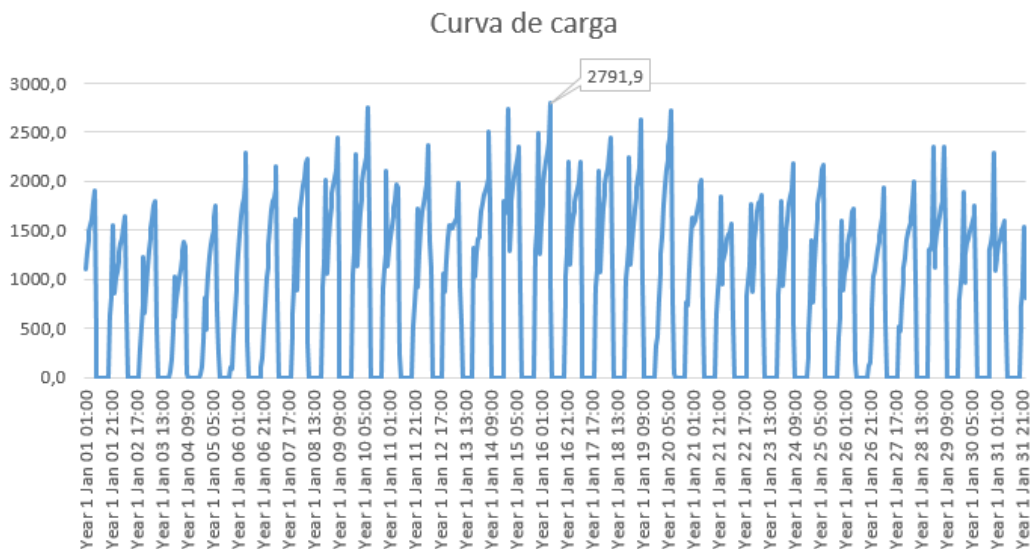


Figura 3.13 Curva de carga para o mês de janeiro, situação inicial set-points  $18^{\circ}C$

Nesta análise não foi incluído nenhum coeficiente de segurança para o cálculo da curva de carga (totais para a habitação em estudo) e o modo de controlo “*air temperature*” foi selecionado para a definição dos *set-points* de aquecimento, que é contabilizado através da temperatura média do ar, na zona.

Note-se pela Figura 3.13, que o pico de aquecimento acontece no dia 16 de janeiro, onde encontra a potência mais elevada (2,79 kW), no total de todas as zonas climatizadas da habitação. As diferenças apuradas em diferentes dias do mesmo mês devem-se principalmente à variação das condições exteriores, particularmente temperatura exterior, tendo influência nos índices de convecção e por sua vez na transmissão de calor pela envolvente. Parte dessas diferenças também derivam dos perfis de ocupação seguem padrões diferentes durante os fins de semana, alterando os ganhos internos devido aos ocupantes, originando um impacto na potência de aquecimento.

Elaborando uma análise ao “*heating design*” do software, para a estação de aquecimento (considerado 5 meses: de novembro a março), é possível obter o balanço térmico em regime estacionário no momento em que ocorre a carga máxima de aquecimento, para os totais da habitação

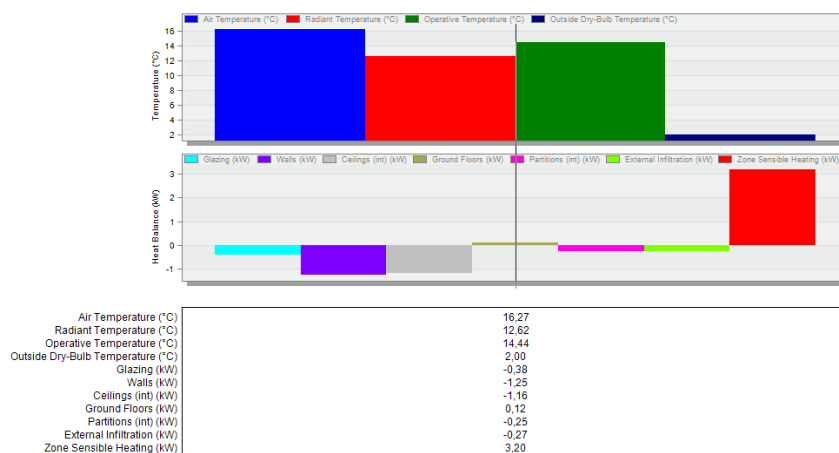


Figura 3.14 "Heating Design" ganhos internos e potência aquecimento situação inicial com *set-points* de 18°

Analisando a Figura 3.14 é possível verificar que as perdas de valor mais elevado, cerca de 53% das cargas trocadas com o exterior (as perdas pelo telhado também foram contabilizadas com valores resultantes da simulação de 1,16 kW), ocorrem devido ao mau isolamento das paredes e superfícies envidraçadas, como seria espectável, dados os elevados coeficientes de transmissão de calor dos elementos construtivos e superfícies envidraçadas de vidros simples com reduzidas espessuras. A potência de aquecimento calculada (com temperatura exterior de 2°C) resultou em 3.20kW, para manter os espaços climatizados com *set-points* de 18°C (valor segundo o Manual SCE

[21] para a estação de aquecimento), sendo que o software, para o “*heating design*”, não contabiliza os ganhos internos e solares, resultando num valor mais elevado, comparado com o pico da curva de carga.

Tabela 3.1 Potência Aquecimento e ganhos/perdas em cada zona da habitação, em kW

Zona	Potência aquecimento	Perdas superfícies envidraçadas	Perdas paredes	Perdas piso	Perdas cobertura	Perdas Exfiltrações
Cozinha	0	-0.03	-0.004	0.160	-0.109	-0.018
WC	0.28	-0.038	-0.142	-0.007	-0.077	-0.016
Quarto1	0.62	-0.069	-0.355	0	-0.160	-0.037
Quarto 2	0.82	-0.047	-0.363	-0.020	-0.317	-0.077
Sala	1.47	-0.193	-0.650	-0.014	-0.494	-0.124
<b>Total</b>	<b>3.20</b>					

A Tabela 3.1 representa o balanço térmico em estado estacionário considerando uma temperatura exterior de 2°C, e, efetivamente as maiores perdas acontecem pelas paredes, cerca de 46% do total apurado. O que, conjugado com as perdas pela cobertura (35%) e superfícies envidraçadas (11%) torna evidente ser o mau isolamento térmico e a conseqüente pobre qualidade construtiva das habitações, um dos principais, se não o principal, fator que condiciona o muito baixo desempenho energético que é reconhecido no setor habitacional em Portugal.

Em Wang R. et al. [68] é referenciado que para ambientes frios, é possível obter temperaturas de conforto interior menores do que 18°C. Claro está, que se optar por utilizar set-points de 16°C, a potência de aquecimento é reduzida para 2.65 kW, cerca de 20% abaixo do valor simulado anteriormente. (Figura 3.15).

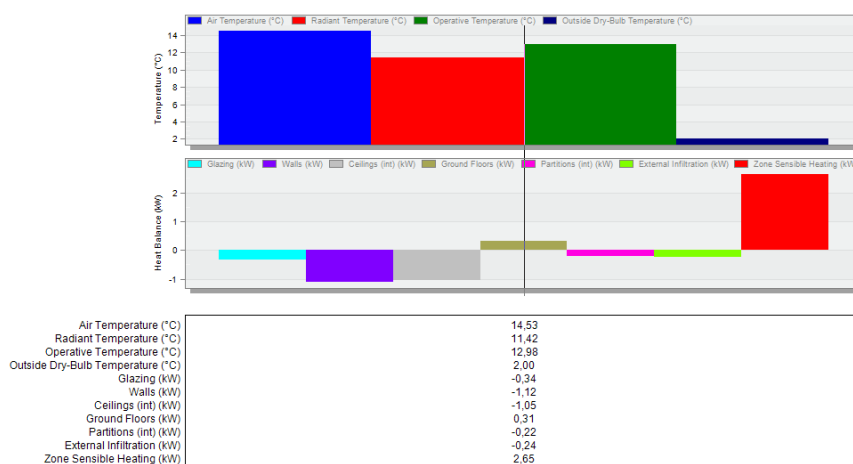


Figura 3.15 "Heating Design" ganhos internos e potência aquecimento situação inicial com set-points de 16°C

Pela Figura 3.16 é possível verificar que esta alteração aos *set-points* provocou uma atenuação na curva de carga, sendo que o pico máximo de potência teve uma redução de 24%, ou seja, em valor absoluto 2,112 kW. Utilizando *set-points* de 16°C para o interior dos espaços climatizados origina a uma redução significativa nas potências de aquecimento simuladas, sendo que se torna interessante verificar o impacto que teria a alteração de elementos construtivos, nomeadamente isolamentos das paredes exteriores e superfícies envidraçadas, na redução da curva de carga simulada, situação que se discutirá de forma mais aprofundada em subcapítulos subsequentes.

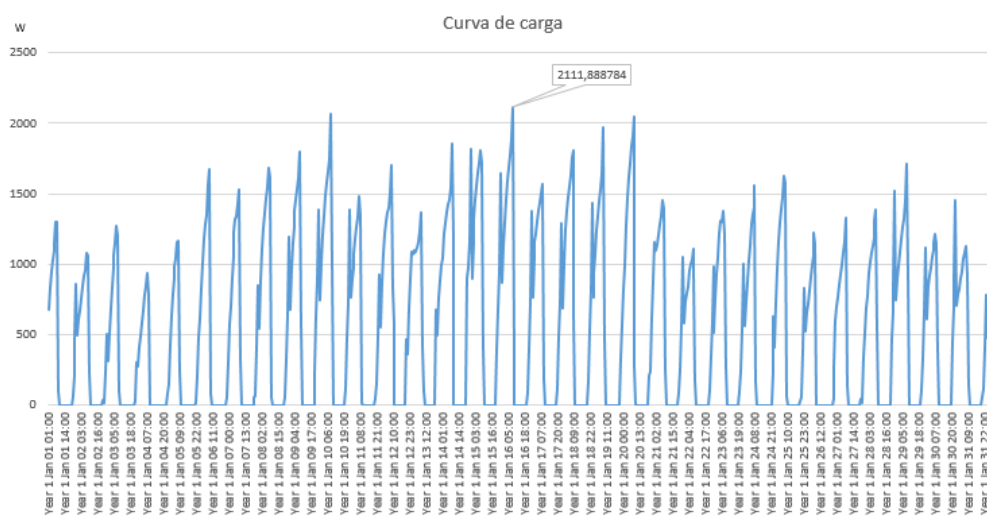


Figura 3.16 Curva de carga para o mês de janeiro, situação inicial *set-points* 16°C

### 3.3. Simulações energéticas para diferentes soluções

Serão selecionadas quatro soluções para o aquecimento ambiente e AQS da habitação, sendo as mesmas por fontes de energia diferentes:

- Eletricidade – Solução 1 e 2
- Biomassa (lenha/pellets) – Solução 3
- GPL (gás petróleo liquefeito) – Solução 4

A estimativa para consumo médio diário de AQS a utilizar no software, foi calculado segundo o Manual SCE [21] para o consumo de referência através da seguinte equação:

$$M_{AQS} = 40 * n_{oc} * f_{eh} \text{ [litros]} \quad (3.1)$$

Em que,

$n_{oc}$  – Número de ocupantes convencionais do edifício em função da tipologia [ocupantes];

$f_{eh}$  – Fator de eficiência hídrica, aplicável a chuveiros ou sistemas de duche com certificação e rotulagem de eficiência hídrica.

O valor de  $f_{eh}$  assume o valor de 0,9 para chuveiros ou sistemas de duche com rótulo A ou superior ou para sistemas com recuperação térmica das águas residuais para preparação de AQS e um valor igual a 1 nos restantes casos, incluindo na ausência da referida certificação e rotulagem. Dessa forma, sendo o número total de ocupantes de 3 e o fator de eficiência hídrica de 1, obtêm-se um valor de 120 litros/dia, sendo esse o valor utilizado para a estimativa do consumo de AQS utilizado no software.

### **Solução 1: eletricidade (Unidades *mono-split* e termoacumulador)**

Para o efeito será selecionado no software, através do menu HVAC (*simple HVAC*), um exemplo de termoacumulador para AQS com eficiência de 96% e bombas de calor ar-ar unitárias (*mono-split*) para cada uma das zonas climatizadas com um SCOP de 4 e potência 3.3kW (consultado em [69] e [70]). O preço para a eletricidade considerado foi retirado do Quadro de Tarifas Energia Elétrica vigentes a partir de 1 de janeiro de 2024, da ERSE [71]. Para cálculo da energia primária utilizaram-se os fatores referidos anteriormente na Tabela 2.1, sendo que para a eletricidade toma o valor de 2,5 kWh<sub>EP</sub>/kWh. Os fatores para as emissões de CO<sub>2</sub> também foram retirados do Decreto-Lei 101-D/2020 [72] e encontram-se na Tabela 2.2, sendo para a eletricidade 0,144 kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>EP</sub>. Na Tabela 3.2 encontram-se os valores resultantes e calculados para a simulação da Solução 1 relativamente ao mês de janeiro e à estação de aquecimento (5 meses).

*Tabela 3.2 Consumo, custos operação, energia primária e emissões CO<sub>2</sub> (solução eletricidade 1) para o mês de janeiro e para a estação de aquecimento*

<b>Solução eletricidade 1</b>		
	Mês de janeiro	Estação aquecimento
<b>Consumo eletricidade [kWh]</b>	435,41	2006,00
<b>Custos operação [eur]</b>	79,90	368,10
<b>Energia Primária [kWh<sub>EP</sub>]</b>	1088,53	5015,00
<b>Emissões de CO<sub>2</sub> [kgCO<sub>2</sub>]</b>	156,75	722,16

### **Solução 2: eletricidade (bomba de calor ar-água)**

A segunda solução também utiliza como fonte de energia eletricidade, mas considerando um sistema bomba de calor ar-água para aquecimento e AQS com COP nominal de 3.57 e potência 5kW (consultado em [73]). Os valores para os fatores de

energia primária e emissões de CO<sub>2</sub> serão os mesmos que a primeira solução. Numa aproximação para a potência da bomba circuladora (considerado entre 5-80W) e área a climatizar de 65.85m<sup>2</sup>, pode assumir-se um valor de 80/65.85 = 1.21W/m<sup>2</sup>. Na Tabela 3.3 encontram-se os valores calculados resultantes da simulação para a Solução 2.

*Tabela 3.3 Consumo, custos operação, energia primária e emissões CO<sub>2</sub> (solução eletricidade 2) para o mês de janeiro e para a estação de aquecimento*

<b>Solução eletricidade 2</b>		
	Mês de janeiro	Estação aquecimento
<b>Consumo eletricidade [kWh]</b>	259,21	1121,71
<b>Custos operação [eur]</b>	47,57	205,83
<b>Energia Primária [kwh<sub>EP</sub>]</b>	648,03	2804,28
<b>Emissões de CO<sub>2</sub> [kgco<sub>2</sub>]</b>	93,32	403,82

### **Solução 3: biomassa (salamandra/caldeira)**

Utilizando como equipamento de aquecimento uma caldeira a pellets, com eficiência de 83.1% (potência para aquecimento 4.2kW e potência para AQS 3.8kW consultado em [74]) o consumo total da habitação já vai ser partilhado entre eletricidade e biomassa (biomassa para o sistema de produção de calor e eletricidade para a bomba recirculadora, iluminação e equipamentos elétricos). Relativamente à energia primária, o fator de conversão para os pellets tomará o valor de 1 [21]; O preço utilizado para os pellets foi retirado de [75], 4,80€/kg; O valor do poder calorífico inferior (PCI) foi retirado do Despacho n.º 17313/2008 [76] sendo para os pellets 16.8 MJ/kg e do fator de emissão 0 para biomassa, retirado de [21]. Utilizou-se o mesmo valor para a potência da bomba circuladora, 1.21W/m<sup>2</sup>. Na Tabela 3.4 encontram-se os valores resultantes da simulação para a Solução 3.

*Tabela 3.4 Consumo, custos operação, energia primária e emissões CO<sub>2</sub> (solução biomassa 3) para o mês de janeiro e para a estação de aquecimento*

<b>Solução biomassa 3</b>		
	Mês de janeiro	Estação aquecimento
<b>Consumo eletricidade [kWh]</b>	102,11	508,97
<b>Consumo pellets [kWh]</b>	788,05	3201,16
<b>Consumo pellets [kg]</b>	168,87	685,96
<b>Custos operação [eur]</b>	72,77	312,90
<b>Energia Primária [kwh<sub>EP</sub>]</b>	1043,33	4473,59
<b>Emissões de CO<sub>2</sub> [kgco<sub>2</sub>]</b>	36,76	183,23

#### **Solução 4: combustível GPL (caldeira)**

Na quarta solução será selecionada uma caldeira de condensação a gás (potência 24kW) com eficiências preconizadas de 94% e 88% em, respetivamente, aquecimento ambiente e AQS (consultado em [77]). Tendo em conta a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos [78], o preço para o GPL engarrafado a considerar será 2€/kg, tendo os valores do PCI (46 MJ/kg) e emissões de CO<sub>2</sub> (0.170 kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>EP</sub>) sido retirados de [76] e [21], respetivamente. Utilizou-se o mesmo valor para a potência da bomba circuladora, 1.21W/m<sup>2</sup>. Na Tabela 3.5 encontram-se os valores resultantes da simulação para a Solução 4.

*Tabela 3.5 Consumo, custos operação, energia primária e emissões CO<sub>2</sub> (solução GPL 4) para o mês de janeiro e para a estação de aquecimento*

<b>Solução GPL 4</b>		
	Mês de janeiro	Estação aquecimento
<b>Consumo eletricidade [kWh]</b>	102,11	508,97
<b>Consumo GPL [kWh]</b>	726,61	2976,87
<b>Consumo GPL [kg]</b>	56,87	232,97
<b>Custos operação [eur]</b>	132,47	559,34
<b>Energia Primária [kWh<sub>EP</sub>]</b>	981,89	4249,30
<b>Emissões de CO<sub>2</sub> [kgco<sub>2</sub>]</b>	160,28	689,30

Conforme representado nas tabelas anteriores, é evidente a diferença nos valores obtidos para as várias soluções, nomeadamente nos consumos operacionais, energia primária, e nas emissões de CO<sub>2</sub>. Será elaborada uma análise relativa aos resultados obtidos pelas diferentes simulações nos próximos subcapítulos.

### **3.4. Análise e comparação de resultados**

Na esteira do desenvolvido nos subcapítulos anteriores, pretende-se levar à prática, na presente secção, a comparação entre os resultados obtidos pelas simulações energéticas, e elencados previamente nas Tabelas 3.2 a 3.5. Seguidamente, serão comparados os diferentes vetores, analisando as várias soluções energéticas para o aquecimento da habitação: energético, económico e ambiental.

Tabela 3.6 Resultados simulações para as diferentes soluções (estação aquecimento)

	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
<b>Consumo eletricidade [kWh]</b>	2006,00	1121,71	508,97	508,97
<b>Consumo GPL [kWh]</b>	0,00	0,00	0,00	2976,87
<b>Consumo GPL [kg]</b>	0,00	0,00	0,00	232,97
<b>Consumo pellets [kWh]</b>	0,00	0,00	3201,16	0,00
<b>Consumo pellets [kg]</b>	0,00	0,00	685,96	0,00
<b>Custos operação [eur]</b>	368,10	205,83	312,90	559,34
<b>Energia Primária [kwh<sub>EP</sub>]</b>	5015,00	2804,28	4473,59	4249,30
<b>Emissões de CO<sub>2</sub> [kgCO<sub>2</sub>]</b>	722,16	403,82	183,23	689,30

Analisando a Tabela 3.6, elaborada a partir dos resultados obtidos pelas várias simulações para a estação de aquecimento, a primeira e segunda soluções (utilizando energia elétrica) oferecem resultados distintos. A Solução 1 (unidades mono-split+termoacumulador) devido às eficiências dos equipamentos, nomeadamente do termoacumulador ( $\eta=0.96$ ) oferece um consumo muito superior ao da Solução 2 (bomba de calor ar-água) que possui um COP elevado, resultando em maiores eficiências comparativamente a outras soluções (para aquecimento e AQS). Por essa razão, a Solução 2 encontra cerca de 56% dos valores em energia primária e emissões de CO<sub>2</sub> comparativamente à primeira solução, e a mesma redução em percentagem para os custos de operação ( $205.83\text{€}_{\text{eletricidade}}/\text{estação aquecimento}$ ).



Figura 3.17 Custos operacionais para as diferentes soluções (estação de aquecimento)

A Solução 3, oferece custos um pouco superiores aos da Solução 2 ( $312.90\text{€}/\text{estação aquecimento}$ ). Sendo a fonte de energia biomassa (pellets), e tratando-se esta de uma forma de energia primária, conjugadamente aos consumos de energia elétrica da iluminação e equipamentos elétricos, resulta em valores de emissões de CO<sub>2</sub> muito inferiores relativamente a todas as outras soluções, sendo que em energia primária acaba por ser mais elevado que as Soluções 2 e 4. Isto deve-se não apenas

ao facto de nesse valor estar incorporado o consumo de energia elétrica relativamente à iluminação e equipamentos elétricos, como também às baixas eficiências das caldeiras a pellets, quando comparadas a bombas de calor. A quarta solução, é a que oferece custos mais elevados de operação ao longo da estação (559.34€). Regista valores superiores à Solução 1 (aumento de cerca de 52%), e conta com mais 171% e 79% dos custos, durante os 5 meses de inverno em estudo, comparativamente às Soluções 2 e 3, respetivamente (Figura 3.17).

Repare-se que os resultados obtidos para a Solução 3, demonstram uma das razões da população portuguesa utilizar biomassa. Os custos de compra e operação reduzidos, conseguem competir com os preços elevados da energia elétrica praticados no país. Adicionando a acessibilidade, não só a este tipo de biomassa, mas também à mais tradicional lenha – esta solução acaba por intervir favoravelmente em duas dimensões, recurso a uma fonte renovável de energia e redução significativa da carga de combustível nas matas e florestas do país - este cenário acontece em muitas partes do território, mostrando ser uma solução viável nessa vertente, bem como no panorama ambiental. Contudo, em termos de conforto térmico pode trazer algumas contrariedades (devido à prática da utilização de lareiras). Por outro lado, a Solução 3 tem a desvantagem da necessidade de alimentação da salamandra/caldeira com o combustível (pellets), bem como a sua limpeza/manutenção. Ao longo da estação, 685 kg de pellets é uma quantidade considerável, comparado às outras soluções, que não têm esse inconveniente.

Aparentemente, a solução através da utilização de energia elétrica com bomba de calor é a que oferece valores mais atrativos, no que respeita a custos mensais operacionais ao longo da estação de inverno. A solução a pellets é a que oferece menores emissões de CO<sub>2</sub>, no entanto, torna-se necessário considerar os custos de aquisição, instalação e manutenção dos equipamentos para a elaboração um estudo de viabilidade económica ao longo de um tempo definido (15 anos). Dessa forma, é possível ter uma avaliação mais completa dos custos das diferentes soluções, e conseguir apurar qual a que realmente é mais vantajosa, não só em termos de custos operacionais, como todos os custos inerentes à aquisição dos equipamentos e sua manutenção, em que alguns resultados podem não ser óbvios numa primeira instância.

A solução existente consiste numa lareira praticamente inutilizada (considerando eficiência de 30%, em que parte do produto térmico da queima de lenha perde-se pela chaminé) localizada na sala, e os outros espaços da habitação carecem de qualquer climatização. Para AQS foi utilizado um termoacumulador com eficiência de 96% [69].

O preço considerado para a lenha foi 500€/1000kg. O valor do PCI utilizado para este tipo de biomassa também foi retirado de [76] (14 MJ/kg). Embora o preço da lenha em Portugal seja mais reduzido que o dos pellets, não se torna suficiente para garantir viabilidade em termos de custos das faturas energéticas (Tabela 3.7, Custos operacionais anuais). Para os custos operacionais em 15 anos, acaba por ter um valor inferior às outras soluções uma vez que não existe nenhum investimento inicial para esta solução. Dada a baixa eficiência da lareira, após uma simulação para a solução existente, durante a estação de aquecimento, foram obtidos 1249.75 kWh de lenha e 1706.44 kWh de eletricidade, sendo que os quartos e a casa de banho não teriam qualquer equipamento para climatização. Tendo em conta estes valores, resultantes da simulação para a lareira, foram calculados os custos operacionais demonstrados na Tabela 3.7.

*Tabela 3.7 Payback time (anos) diferentes soluções comparativamente à solução existente (lareira) sala*

	<b>Solução 1</b>	<b>Solução 2</b>	<b>Solução 3</b>	<b>Solução 4</b>	<b>Sol. Existente</b>
<b>Custos equipamentos + instalação*</b>	4848	8713	4185	1892	-
<b>Custos manutenção</b>	50	50	50	50	50
<b>Custos operacionais anuais</b>	368,10	205,83	312,90	559,34	523,81
<b>Custos operacionais 15 anos</b>	10369,80	11800,12	8878,52	10282,41	7857,21
<b>Poupança anual</b>	155,71	317,98	210,91	-35,53	-
<b>Payback-time (anos)</b>	31,14	27,40	19,84	-53,26	-

\*Os custos dos diferentes equipamentos e instalação foram obtidos em [79]

A Tabela 3.7 apresenta um cálculo do *payback* simples para as diferentes soluções comparativamente à solução existente. O custo operacional para a estação de aquecimento da solução existente (523.81€, calculado através dos resultados obtidos em simulação mencionados anteriormente e custos energéticos associados) seria superior quando comparado a todas às outras soluções, com exceção da Solução 4. Para esta última solução o período de retorno apresenta um valor negativo (-53.26 anos) uma vez que não oferece nenhuma poupança anual, e os custos operacionais anuais são 6.4% superiores comparativamente à solução existente. Contudo, esta solução não promove, claramente, as condições mínimas de conforto estabelecidas para as restantes simulações, razão pela qual, de forma a garantir a uniformidade do caso-base, se optou por uma estratégia alternativa.

Assim, preconizou-se uma solução base em que se assume a climatização de todos os espaços através da lareira, e os custos para a utilização da lenha (951.16€, calculados através dos resultados obtidos em simulação e custos energéticos associados) seriam muito superiores aos de qualquer outra solução, uma vez que existem muitas perdas pela chaminé e, conseqüentemente, baixa eficiência de transmissão. (Tabela 3.8). Dessa forma, o *payback time* é fortemente reduzido, no entanto, também não tem aplicabilidade prática, uma vez que a lareira se encontra em apenas numa, e não em todas as divisões, o que é o representado por estes valores. Repare-se que esta pequena análise mostraria que o período de retorno da Solução 3 seria cerca de metade da Solução 2, devido aos preços elevados dos equipamentos e instalação de bombas de calor para Aquecimento e AQS, comparativamente a outras soluções.

*Tabela 3.8 Payback time (anos) diferentes soluções comparativamente à solução existente (lareira) total*

	<b>Solução 1</b>	<b>Solução 2</b>	<b>Solução 3</b>	<b>Solução 4</b>	<b>Sol. Existente</b>
<b>Custos equipamentos + instalação*</b>	4848	8713	4185	1892	-
<b>Custos manutenção</b>	50	50	50	50	50
<b>Custos operacionais anuais</b>	368,10	205,83	312,90	559,34	951,16
<b>Custos operacionais 15 anos</b>	10369,80	11800,12	8878,52	10282,41	14267,47
<b>Poupança anual</b>	583,06	745,33	638,26	391,82	-
<b>Payback-time (anos)</b>	8,32	11,69	6,56	4,83	-

\*Os custos dos diferentes equipamentos e instalação foram obtidos em [79]

É eventualmente possível, através da implementação de um permutador, aproveitar o calor da lareira para os outros espaços climatizados, e utilizar esta solução para o aquecimento. Dessa forma, seriam necessários componentes adicionais ao equipamento e, naturalmente, traria custos associados a essa implementação de aproveitamento térmico lareira. Utilizando um sistema de aproveitamento a água para a lareira, com eficiência de 75% (consultado em [80]), é possível elaborar uma comparação com as diferentes soluções, contabilizando o custo da aquisição e instalação do recuperador, consultado em [79].

Tabela 3.9 Payback time (anos) diferentes soluções comparativamente à solução existente com adição de um permutador de calor a água

	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Sol. Existente + recuperador
<b>Custos equipamentos + instalação*</b>	4848	8713	4185	1892	1400
<b>Custos manutenção</b>	50	50	50	50	50
<b>Custos operacionais anuais</b>	368,10	205,83	312,90	559,34	608,48
<b>Custos operacionais 15 anos</b>	10369,80	11800,12	8878,52	10282,41	9127,27
<b>Poupança anual</b>	240,38	402,65	295,58	49,14	-
<b>Payback-time (anos)</b>	20,17	21,64	14,16	38,51	-

\*Os custos dos diferentes equipamentos e instalação foram obtidos em [79]

Os custos operacionais para a solução utilizando um recuperador de calor (608,48€) foram calculados através dos resultados obtidos da simulação para esta solução utilizando os custos energéticos mencionados anteriormente.

Como representado na Tabela 3.9, reduzindo os custos para o aquecimento com recuperação a água, evidentemente que o *payback-time* de todas as soluções se torna mais elevado, sendo que para a Solução 4 (GPL) torna-se muito insatisfatório, e sem viabilidade económica, uma vez que a poupança anual é bastante reduzida (49.14€/estação de aquecimento). Inerentemente, a Solução 2 (bomba de calor) tendo custos de investimento iniciais superiores, terá o seu período de retorno mais elevado que as outras restantes soluções (21.64 anos). A Solução 3 (caldeira a pellets) já começa a demonstrar resultados mais atrativos na vertente económica, com o *payback-time* em 14.16 anos, sendo que na ambiental será sempre a que menos quantidades resultantes de CO<sub>2</sub> contabiliza, como demonstrado anteriormente.

Seguidamente, será apresentado um pequeno estudo de viabilidade económica a 15 anos, no que respeita às diferentes soluções, para ser possível verificar qual a resposta mais rentável no final desse período, considerando uma taxa de inflação anual de 2%.

Tabela 3.10 Estudo económico (ano 1 até ao ano 8)

INFLAÇÃO=2%

	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Sol. 1	5216,4	5642,8	6077,8	6521,5	6974,1	7435,7	7906,6	8386,8	8876,7
Sol. 2	8918,4	9179,4	9445,6	9717,1	9994,0	10276,4	10564,6	10858,4	11158,2
Sol. 3	4497,9	4868,0	5245,6	5630,7	6023,5	6424,2	6832,9	7249,8	7675,0
Sol. 4	2451,6	3073,2	3707,1	4353,8	5013,3	5686,1	6372,3	7072,3	7786,2
Lareira+recup.	2008,8	2680,5	3365,6	4064,4	4777,1	5504,2	6245,7	7002,1	7773,6

Custos acumulados [eur]

Nos primeiros 8 anos, a Solução 3 oferece menores custos acumulados devido à diferença no valor de investimento inicial, bem como ao preço da utilização dos pellets, que, conjugadamente com as eficiências dos equipamentos, leva a que no final deste período já exista uma indicação que reflita esta solução ser viável. A Solução 2, embora possua custos anuais, e mensais, inferiores a todas as soluções, o tempo para o retorno do investimento, torna-se elevado, derivado ao custo de aquisição e instalação de bombas de calor (Tabela 3.10).

Tabela 3.11 Estudo económico (ano 9 até ano 15)

	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
	9	10	11	12	13	14	15
Sol. 1	9376,4	9886,0	10405,9	10936,1	11477,0	12028,7	12591,4
Sol. 2	11463,9	11775,8	12093,9	12418,3	12749,3	13086,9	13431,2
Sol. 3	8108,7	8551,0	9002,3	9462,5	9932,0	10410,8	10899,2
Sol. 4	8514,4	9257,2	10014,8	10787,6	11575,9	12379,9	13200,0
Lareira+recup.	8560,6	9363,3	10182,0	11017,1	11869,0	12737,8	13624,0

Custos acumulados [eur]

Repare-se pela Tabela 3.11, que ao final do 15º ano, a Solução 3 continua a oferecer custos acumulados inferiores (10899.2€), seguido da Solução 1 (12591.4€). Esta última já conseguiu recuperar o investimento inicial comparativamente às outras soluções com exceção da Solução 3. No entanto, a Solução 2 (bomba de calor ar-água) já começa a ter o valor de investimento inicial cada vez mais diluído nos custos acumulados, chegando eventualmente a compensar essa aplicação de capital. Tendo custos mensais inferiores a todas as outras soluções, 47.57€<sup>eletricidade/mês de janeiro</sup> e 205.83€<sup>eletricidade/estação aquecimento</sup> (Tabela 3.3), elaborar um estudo para este tipo de investimento assumindo

períodos temporais mais longos do que 15 anos, pode ser excessivamente otimista. Note-se que, pela Tabela 3.12, apenas no final do 30º ano é que a Solução 2 (bomba de calor ar-água) teria custos acumulados de valor inferior a todas as outras soluções, oferecendo também valores nas faturas energéticas de ordem inferior.

Tabela 3.12 Estudo económico (ano 26 até ano 30)

	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
	26	27	28	29	30
Sol. 1	19575,8	20289,4	21017,4	21759,8	22517,2
Sol. 2	17704,9	18141,6	18587,0	19041,3	19504,7
Sol. 3	16961,6	17581,0	18212,8	18857,3	19514,6
Sol. 4	23379,0	24419,1	25480,0	26562,1	27665,8
Lareira+recup.	24624,1	25748,0	26894,5	28063,8	29256,6

Custos acumulados [eur]

Em seguida, será realizado um estudo para verificar a influência que a alteração das superfícies envidraçadas e isolamento térmico às paredes exteriores, acarreta nos custos energéticos, e se aufera alguma viabilidade económica para este caso particular. Os custos considerados para este investimento na melhoria de alguns elementos da habitação, para sete janelas de vidro duplo, e isolamento térmico das paredes exteriores e pintura das fachadas, encontram-se listados seguidamente (consultados em [79]):

- Janelas de vidro duplo com caixa de ar de 13mm → 7un \* 246.43€ = 1725.01€
- Isolamento paredes exteriores poliuretano alta densidade de placa (40mm) → 150m<sup>2</sup> \* 20.54€/m<sup>2</sup> = 3081€
- Pintura paredes exteriores → 150m<sup>2</sup> \* 13.01€/m<sup>2</sup> = 1951.5€
- Custo total reabilitação → 6757.51€

Foram selecionadas para o efeito as Soluções 2 (bomba de calor) e 3 (salamandra a pellets), que obtiveram melhores resultados nas simulações anteriores relativamente a custos mensais e acumulados, respetivamente. Foram adicionadas as alterações à construção e superfícies envidraçadas no DesignBuilder [40], tal como a taxa de renovação horária resultante das infiltrações (0.20 rph [63]).

Foram obtidos os resultados das simulações relativamente aos consumos, e calculados os custos de operação para a estação de aquecimento, apresentados na Tabela 3.13, sendo que a potência de aquecimento foi reduzida para 2,08kW (cerca de 21,5%, relativamente ao caso base atual), originando uma redução na curva de carga.

Tabela 3.13 Consumos e custos obtidos para as soluções 2 e 3, considerando vidros duplos e isolamento térmico de 40 mm nas paredes exteriores

<b>Solução eletricidade 2 + reabilitação</b>	
	Estação aquecimento
Consumo eletricidade [kWh]	1041,19
Custos operação [eur]	191,06
<b>Solução biomassa 3 + reabilitação</b>	
	Estação aquecimento
Consumo eletricidade [kWh]	508,04
Consumo pellets [kWh]	2857,17
Consumo pellets [kg]	612,25
Custos operação [eur]	289,15

Assim, é possível elaborar uma pequena comparação ao payback-time simples, para estas soluções, considerando o investimento dos equipamentos para aquecimento e de reabilitação da habitação, comparando à solução existente (lareira) com recuperador de calor a água.

Tabela 3.14 Comparação do payback simples para as soluções 2 e 3 considerando os custos de investimento para reabilitação da habitação

	<b>Sol.2</b>	<b>Sol.3</b>	<b>Sol.2+Rea</b>	<b>Sol.3+Rea</b>	<b>Sol. Existente + recuperador</b>
<b>Custos investimento</b>	8712,6	4185,0	15470,1	10942,5	1400
<b>Custos manutenção</b>	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
<b>Custos operacionais anuais</b>	205,8	312,9	191,1	289,1	608,48
<b>Poupança Anual</b>	402,65	295,58	417,43	319,34	-
<b>Payback-time (anos)</b>	21,64	14,16	37,06	34,27	-

Efetivamente, os custos operacionais energéticos (estação de aquecimento) tornaram-se inferiores devido ao melhor isolamento das paredes e superfícies envidraçadas em ambas as soluções. No entanto, o custo de investimento para a reabilitação da habitação, neste âmbito, torna-se elevado, adicionado aos custos dos equipamentos e sua instalação, o que faz aumentar o payback-time simples de 71,3%, para a Solução 2, e de 142% para a Solução 3. A redução nos custos anuais para o aquecimento, durante a estação de inverno, para a Solução 2, com as implementações

construtivas em estudo, situaram-se em cerca de 7,1% e para a Solução 3 de 7,6%, sendo em valor absoluto 14,7€ e 23,8€, respetivamente. (Tabela 3.14)

Elaborando um estudo a 15 anos, é possível verificar a diferença nos custos acumulados das soluções apresentadas, tendo em conta as alterações aos elementos construtivos em questão.

Tabela 3.15 Estudo a 15 anos para os custos acumulados para as soluções estudadas (ano 1 - ano 8)

INFLAÇÃO=(2%)

	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Sol. 1	5216,4	5642,8	6077,8	6521,5	6974,1	7435,7	7906,6	8386,8	8876,7
Sol. 2	8918,4	9179,4	9445,6	9717,1	9994,0	10276,4	10564,6	10858,4	11158,2
Sol. 3	4497,9	4868,0	5245,6	5630,7	6023,5	6424,2	6832,9	7249,8	7675,0
Sol. 4	2451,6	3073,2	3707,1	4353,8	5013,3	5686,1	6372,3	7072,3	7786,2
Lareira+recup.	2008,8	2680,5	3365,6	4064,4	4777,1	5504,2	6245,7	7002,1	7773,6
Sol. 2+reab.	15661,18	15907,1	16259,9	16619,8	16986,9	17361,4	17743,3	18132,9	18530,2
Sol. 3+reab.	11231,6	11577,5	11828,3	12084,2	12345,1	12611,2	12882,7	13159,6	13442,0

Custos acumulados [eur]

Tabela 3.16 Estudo a 15 anos para os custos acumulados para as soluções estudadas (ano 8 - ano 15)

	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
	9	10	11	12	13	14	15
Sol. 1	9376,4	9886,0	10405,9	10936,1	11477,0	12028,7	12591,4
Sol. 2	11463,9	11775,8	12093,9	12418,3	12749,3	13086,9	13431,2
Sol. 3	8108,7	8551,0	9002,3	9462,5	9932,0	10410,8	10899,2
Sol. 4	8514,4	9257,2	10014,8	10787,6	11575,9	12379,9	13200,0
Lareira+recup.	8560,6	9363,3	10182,0	11017,1	11869,0	12737,8	13624,0
Sol. 2+reab.	18935,5	19348,9	19770,6	20200,8	20639,5	21087,0	21543,4
Sol. 3+reab.	13730,1	14024,0	14323,7	14629,4	14941,3	15259,3	15583,8

Custos acumulados [eur]

Conforme demonstrado nas Tabelas 3.15 e 3.16, 15 anos tornar-se-ia insuficiente para que o valor do investimento na reabilitação da habitação (isolamento térmico e superfícies envidraçadas) compensasse os custos acumulados para o consumo energético da moradia (estação de aquecimento). Embora estas soluções ofereçam valores mensais e anuais mais reduzidos nas faturas energéticas, a Solução 2 teve um aumento nos custos acumulados de 60% e a Solução 3 de 43% derivado ao elevado custo de investimento em materiais e instalação para isolamentos térmicos nas paredes exteriores e para as superfícies envidraçadas de vidro duplo.

A alteração destes elementos construtivos (isolamentos e superfícies envidraçadas) também teria impacto nos consumos e custos para o arrefecimento da habitação (estação de arrefecimento), uma vez que a envolvente teria valores de coeficiente de transmissão de calor mais reduzidos, o que não foi considerado neste estudo. Dessa forma, a resultante do período de retorno tornar-se-ia mais reduzida.

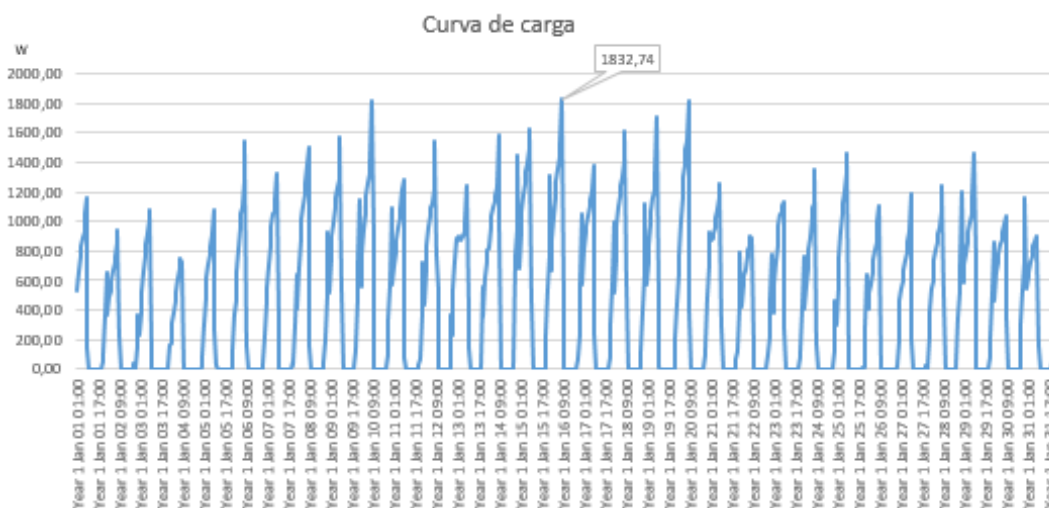


Figura 3.18 Curva de carga para o mês de janeiro, reabilitação e set-points 16°C

Analisando a Figura 3.18, é possível verificar, como seria expectável, a redução da curva de carga na habitação (representado o mês de janeiro, onde ocorre o pico de potência) acontece devido a melhorias nos materiais construtivos da envolvente. Alterando as superfícies envidraçadas e adicionando isolamento às paredes exteriores ocorreu uma redução na potência máxima de 13,25%, para um valor absoluto de 1,832kW, considerando set-points de 16°C.

Comparativamente à curva de carga da habitação utilizando set-points de 18°C, com esta reabilitação na moradia através da implementação de janelas de vidro duplo e isolamento nas paredes exteriores, a redução no pico de potência seria de 34,34%. Representa um valor considerável, traduzindo-se na necessidade de equipamentos de potências inferiores, como em reduções nos valores das faturas energéticas. Uma vez que o investimento inicial é de valor considerável, acabou por se verificar que o período de retorno tornar-se-ia elevado.

Assim, constatou-se neste capítulo, numa primeira instância, que a Solução 2 (eletricidade, bomba de calor ar água) oferecia custos energéticos inferiores às outras soluções, sendo a Solução 4 (GPL), e a Solução existente utilizando recuperador de calor, as mais dispendiosas. Relativamente às emissões de CO<sub>2</sub> a Solução 3 (pellets) foi que resultou em valores inferiores a todas as outras soluções nesta vertente. Numa análise económica a 15 anos verificou-se que o elevado custo de investimento em

bombas de calor tornaria os custos acumulados, neste período, superiores às outras soluções excetuando a Solução existente com recuperador. A solução que apresentou valores mais atrativos, relativamente aos custos acumulados no período de 15 anos, foi a Solução 3 (pellets). O seguinte capítulo refere estas, e as conclusões de mais importância discutidas neste trabalho.



## **4. Conclusões e sugestões para trabalho futuro**

### **4.1. Síntese final**

Conforme elencado nos primeiros capítulos deste trabalho, é notório que as preocupações em termos energéticos dos edifícios conduzem um tema de elevada importância, nomeadamente nas vertentes económica e ambiental em toda a UE. Os consumos de energia tendem a aumentar, originando maiores emissões de poluentes relacionados com aumentos de produção de energia primária e fontes energéticas. Em Portugal, o setor doméstico é o terceiro maior consumidor de energia, seja para iluminação, equipamentos elétricos, cozinha, aquecimento de águas quentes sanitárias e arrefecimento ou aquecimento de ambientes. A parcela relativa ao aquecimento (ambiente e AQS) conta com cerca de 42% do consumo total de energia no setor doméstico, sendo, por isso, um objeto que merece a maior atenção devido à sua importância no peso, nos consumos, e na intensidade energética do país. Dada a variedade de equipamentos e fontes energéticas para aquecimento de habitações, e à divergência nos custos associados à sua instalação e operação, revela-se, nos dias de hoje, uma problemática que afeta diretamente a vida dos portugueses, tendo mais impacto na classe média/baixa ou em habitações que se situem em localizações mais remotas.

Sendo a incapacidade para manter as habitações aquecidas e custos da energia, variáveis fundamentais na medição da pobreza energética, é fundamental utilizar os instrumentos e ferramentas disponíveis para obter o máximo de partido das soluções que vão ao encontro das necessidades, e especificidades de cada país, e cada caso particular. Esta problemática conduz ao aumento da probabilidade de utilização de fontes energéticas de elevada intensidade carbónica para o aquecimento de habitações,

situação que foi recentemente agravada, tendo em conta o aumento de preços da energia, provocados pela pandemia de COVID e pela guerra na Ucrânia. Sendo que a pobreza energética, relacionada com a escolha de equipamentos de aquecimento afeta negativamente os objetivos de descarbonização mundial, ficou aqui evidente a importância da devida ponderação e da avaliação desta temática, que tem grande impacto no país.

A simulação energética de edifícios no modelo “*whole building simulation*” é uma ferramenta que permite quantificar o desempenho de edifícios utilizando métodos de cálculo de zona, baseados em balanços térmicos e transferência de calor, focando-se no comportamento geral do edifício e das diferentes zonas. Estas ferramentas, hoje em dia, demonstram conseguir resultados com margens de erro relativamente reduzidas, sendo que é de elevada importância a compreensão e definição dos *inputs* que vão originar impactos significativos nos cálculos finais.

Alinhando os temas acima elencados, o presente trabalho final de mestrado, teve como objetivo uma pequena habitação na região de Samora-Correia/Benavente, tendo conseguido demonstrar que o investimento em equipamentos mais eficientes para o aquecimento de habitações pode oferecer despesas de operação mais reduzidas do que soluções mais tradicionais, ainda que os custos de investimento em alguns equipamentos, e sua instalação, sejam consideráveis. No entanto, revelou-se a importância de verificar os aspetos específicos das várias soluções, uma vez que os resultados nas vertentes energética, económica e ambiental encontram divergências.

Neste caso de estudo, a solução recorrendo a salamandra/caldeira a *pellets* (Solução 3) representou custos acumulados inferiores (menos 20% comparado à solução existente com recuperador de calor). Noutra perspetiva, essa mesma solução (Solução 3) também foi a que obteve resultados mais atrativos na vertente ambiental, com emissões de CO<sub>2</sub> na ordem dos 183 kgCO<sub>2</sub>, 72,1% inferior relativamente à solução que apresentou resultados mais negativos neste âmbito (Solução 4). A solução recorrendo a unidades *split* de ar condicionado e termoacumulador (Solução 1) conseguiu oferecer valores de payback-simples mais reduzidos, uma vez que o investimento inicial, neste tipo de equipamentos, acaba por ser inferior. Não existindo rede hidráulica para a implementação da instalação, possui o inconveniente de ter várias unidades exteriores, o que também pode não ser atrativo esteticamente. A solução bomba de calor ar-água (Solução 2) foi a que mostrou conseguir valores nas faturas energéticas (eletricidade) mais reduzidas para o aquecimento da habitação devido às elevadas eficiências (COP) deste tipo de máquinas. Uma vez que os custos de

instalação destes equipamentos acarretam valores de investimento inicial superiores, comparado ao das outras soluções, faz com que os valores do *payback-time* e custos acumulados se intensifiquem, relativamente às outras soluções (excluindo a Solução 4, GPL). Acabará apenas por oferecer custos acumulados inferiores a todas as outras soluções no final do 30º ano, e, eventualmente, tornar-se uma solução que possa ser exequível para investimentos a longo prazo. A Solução 4, recorrendo à utilização de uma caldeira a GPL, foi a que piores valores ofereceu, nas várias vertentes abordadas, acabando por se verificar como a solução menos atrativa, tendo em conta as fontes energéticas disponíveis para o aquecimento de habitações, e os resultados demonstrados.

Com o presente estudo, também foi possível demonstrar que uma pequena alteração nos isolamentos térmicos e superfícies envidraçadas de melhor qualidade e maiores espessuras, originam impactos positivos nas faturas de energia (redução de 7,1% para a Solução 2 e 7,6% para a Solução 3). Para este caso de estudo particular, embora o investimento na melhoria da envolvente da habitação não encontrasse custos acumulados inferiores e o período de retorno seja elevado, as novas habitações, aquando da sua construção, devem considerar estes aspetos, para que os valores de investimento para a eficiência energética dos edifícios se tornem menores, e compensem para o utilizador. De realçar que através de apoios e incentivos por parte do estado, estas soluções tornar-se-iam mais exequíveis, e os períodos de retorno de investimento resultantes encontrariam valores de ordem inferior.

Desta forma, a solução que apresentou resultados menos atrativos nas várias vertentes analisadas foi a Solução 4 (GPL). Resultou em valores 276% superiores em emissões de CO<sub>2</sub> quando comparado à Solução 3 (pellets) que foi a que teve valores inferiores na vertente ambiental. Relativamente às soluções utilizando energia elétrica, a Solução 1 (unidades mono split e termoacumulador) conseguiu apresentar custos acumulados 6,25% inferiores à Solução 2 (bomba de calor ar-água), que foi a que ofereceu custos das faturas energéticas de ordem inferior a qualquer outra solução. No entanto, verificou-se que o período de retorno de investimento da Solução 2 seria elevado, para o período de 15 anos em estudo. Aliado aos melhores resultados na vertente ambiental, a Solução 3 (pellets) resultou em custos acumulados inferiores às outras soluções, e 18,85% inferior relativamente à Solução 2 (bomba de calor ar-água). A fonte energética a biomassa recorrendo a pellets consegue ser destacada pela importância de conseguir aproveitar resíduos florestais, o que auxilia na limpeza das florestas e reduz a carga de combustível não aproveitado, diminuindo riscos de incêndios e aproveitando recursos que de outra forma não seriam utilizados. Revela

assim ser uma solução energética a considerar, quando existe a intenção de investir em aquecimento aplicado ao setor doméstico.

A utilização de sistemas geradores de eletricidade, como aerogeradores (eólicos) e sistemas fotovoltaicos (solares), revela ter potencial para promover a transição energética e a utilização de energia mais limpa e sustentável. A implementação crescente desses sistemas tem sido fortalecida pelo desenvolvimento de comunidades de energia, grupos locais que produzem, consomem e partilham a energia de forma descentralizada e colaborativa. Essas comunidades podem representar uma solução viável, diversificando a utilização de energia e diminuindo a dependência de importações de combustíveis fósseis. No entanto, grande parte dos materiais e equipamentos necessários para a produção de eletricidade utilizando energia solar e eólica depende de tecnologias e recursos que muitas vezes se encontram concentrados em regiões instáveis politicamente e, fora da Europa. Este fator pode, no limite, gerar uma forma de insegurança energética, uma vez que a Europa passa a depender desses materiais para sustentar sua expansão em renováveis. Portanto, torna-se essencial que a União Europeia não invista apenas na expansão das renováveis, mas também fortaleça as cadeias de produção e reciclagem dos materiais necessários, promovendo a autossuficiência e reduzindo a dependência de países externos.

## **4.2. Sugestões para trabalho futuro**

Como seguimento do trabalho seria interessante aprofundar o tema com questões mais específicas que necessitariam de ser estudadas individualmente.

O estudo apresentado focou-se em diversas fontes energéticas para o aquecimento de uma habitação na estação de inverno. Ao longo do ano, existem fatores que podem influenciar os rendimentos dos equipamentos, como temperaturas exteriores ou eficiências de queima. As simulações representadas neste estudo não consideram as variações das curvas dos equipamentos ao longo do tempo, sendo que seria interessante verificar o impacto nos consumos energéticos e custos acumulados que estas oscilações causariam, tal como diferenças que os custos de manutenção anuais para as diferentes soluções poderiam trazer.

Com as tecnologias recentes de aproveitamento solar, a utilização de energia a partir de fontes renováveis pode demonstrar possuir soluções atrativas, não apenas para aquecimento - aquecimento por sistemas solar térmicos - como para produção de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos. Tornar-se-ia interessante incluir no estudo como seriam afetados os custos das faturas energéticas incluindo estas

alterações para aproveitamento de energia renovável. É evidente, que os custos de investimento inicial tornar-se-iam mais elevados, podendo originar períodos de retorno de investimento diferentes, tendo a possibilidade de oferecer valores nas faturas mensais mais reduzidos. Tanto para o aquecimento como para a produção de energia elétrica em habitações, as tecnologias a serem desenvolvidas futuramente afetarão e terão um impacto significativo nestas análises, através da utilização de energias renováveis, produção localmente e interligação entre a habitação e a rede, tal como sistemas de controlo automatizado.

À medida que as tecnologias avançam e a competitividade do mercado aumenta, torna-se cada vez mais atrativo investir no âmbito da energia em habitações, e tornar o ambiente interior das casas dos portugueses mais confortável, conseguindo abrandar os índices de pobreza energética do país e, simultaneamente, obter custos inferiores nas faturas energéticas.

Desta forma, o presente estudo que se focou numa pequena habitação, pode ser replicado a muitas outras em Portugal, nomeadamente em áreas mais remotas, e deprimidas financeiramente onde o aquecimento no inverno requer que se tire proveito das diversas fontes de energia disponibilizadas, necessariamente, a custos mais acessíveis para os utilizadores. Apresentando-se, simultaneamente, respostas e soluções que permitam reduzir os índices de pobreza energética do país, e ir de encontro às metas e objetivos traçados pela UE.



## Referências

- [1] - *Pobreza Energética*, Comissão Europeia. [online] Disponível em: [https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumer-rights/energy-poverty\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumer-rights/energy-poverty_en) (acedido a 10/02/2024)
- [2] - Bouzarovski, S., & Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty-fuel poverty binary. *Energy Research and Social Science*,
- [3] - Horta, A., & Schmidt, L. (2021). Policy Brief 2021 - *POBREZA ENERGÉTICA EM PORTUGAL*.
- [4] - Kashour, M., & Jaber, M. M. (2024). Revisiting energy poverty measurement for the European Union. *Energy Research and Social Science*,
- [5] - Commission european. (2023). *EU Energy in Figures: statistical pocketbook 2023*. Publications office of the European Union.
- [6] - *Energy Statistics - an overview*, Comissão Europeia, & Eurostat. [online] Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_statistics\\_-\\_an\\_overview](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview) (acedido a 21/09/2024)
- [7] - Kluza, K., Ziolo, M., & Postula, M. (2024). Climate policy development and implementation from the Sustainable Development Goals perspective. Evidence from the European Union countries. *Energy Strategy Reviews*.
- [8] - Jornal Oficial da União Europeia. (2016). *Acordo de Paris*.
- [9] - Comissão Europeia. (2019, dezembro 11). *Comunicação Da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões - Pacto Ecológico Europeu*.
- [10] - Comissão Europeia. (2021). *COMUNICAÇÃO DA COMISSÃO AO PARLAMENTO EUROPEU, AO CONSELHO, AO COMITÉ ECONÓMICO E SOCIAL EUROPEU E AO COMITÉ DAS REGIÕES - Objetivo 55: alcançar a meta climática da UE para 2030 rumo à neutralidade climática*.

- [11] - *Redução das emissões de carbono: objetivos e políticas da União Europeia*, Parlamento Europeu. [online] Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20180305STO99003/reducao-das-emissoes-de-carbono-metas-e-politicas-da-ue> (acedido a 18/04/2024)
- [12] - *Energia - Eficiência Energética – Alterações Climáticas*, Direção Geral da Energia e Geologia. [online] Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/eficiencia-energetica/ambiente-e-clima/alteracoes-climaticas/> (18/04/2024)
- [13] - Governo de Portugal. (2023). *Atualização/Revisão do Plano Nacional de Energia e Clima 2021-2030 (PNEC2030)*.
- [14] - *Comunicação Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050*, Governo Portugal. [online] Disponível em: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/documento?i=roteiro-para-a-neutralidade-carbonica-2050-> (acedido a 18/04/2024)
- [15] - Republica Portuguesa, Fundo Ambiental, & Agência Portuguesa do Ambiente. (2019). *Roteiro Para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) - Estratégia de Longo Prazo Para a Neutralidade Carbónica da Economia Portuguesa em 2050*.
- [16] - *Diretiva do Desempenho Energético dos Edifícios*, Direção Geral da Energia e Geologia. [online] Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/eficiencia-energetica/sistema-de-certificacao-energetica-dos-edificios/diretiva-do-desempenho-energetico-dos-edificios/> (acedido a 18/04/2024)
- [17] - Jornal Oficial da União Europeia. (2010). *Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios*.
- [18] - Jornal Oficial da União Europeia. (2018). *Diretiva 2018/844/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 30 de maio de 2018, que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética*
- [19] - Jornal Oficial da União Europeia. (2024). *Diretiva 2024/1275/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de abril de 2024, relativa ao desempenho energético dos edifícios*.
- [20] - Diário da República. (2020). *Decreto-Lei n.º 101-D/2020*.
- [21] - DGEg - Direção Geral de Energia e Geologia, & ADENE - Agência para a Energia. (2021). *Manual SCE*.
- [22] - República Portuguesa, A. e A. climática, Observatório da Energia, Direção Geral da Energia e Geologia, & ADENE - Agência para a Energia. (2023). *A Energia em Números-Edição 2023*

- [23] - *Energy consumption in households*, Comissão Europeia. [online] Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_consumption\\_in\\_households#Energy\\_consumption\\_in\\_households\\_by\\_type\\_of\\_end-use](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Energy_consumption_in_households_by_type_of_end-use) (acedido a 21/04/2024)
- [24] - Instituto Nacional de Estatística, S. P., & Direção Geral da Energia e Geologia. (2021). *Inquérito ao consumo de energia no setor doméstico 2020*.
- [25] - Campbell, R. (1993). Fuel poverty and government response. *Social Policy & Administration*.
- [26] - Healy, J. D., & Clinch, J. P. (2002). *Fuel poverty, thermal comfort and occupancy: results of a national household-survey in Ireland*.
- [27] - Sagar, A. D. (2005). *Alleviating energy poverty for the world's poor. Energy Policy*.
- [28] - Buzar, S. (2007). *The "hidden" geographies of energy poverty in post-socialism: Between institutions and households*. Geoforum.
- [29] - Pachauri, S., & Spreng, D. (2011). *Measuring and monitoring energy Poverty*.
- [30] - Papada, L., & Kaliampakos, D. (2016). *Measuring energy poverty in Greece. Energy Policy*.
- [31] - Guerra, I. (2011). Cidades, Comunidades e Territórios. As políticas de habitação em Portugal: à procura de novos caminhos, In *Comunidades e Territórios* (Vol. 22).
- [32] - Burguillo, M., del Río, P., & Juez-Martel, P. (2024). *Does energy poverty influence decarbonisation through electrification of the heating Sector?*
- [33] - Abreu, M. I., de Oliveira, R. A. F., & Lopes, J. (2020). Younger vs. older homeowners in building energy-related renovations: Learning from the portuguese case. *Energy Reports*
- [34] - J A Clarke. (2001). *Energy Simulation in Building Design*.
- [35] - G. Brown (1990) *The BRIS simulation program for thermal design of buildings and their services*, Energy and Buildings
- [36] – Herron, D., Walton, G., & Lawrie, L. (1981). *Building Loads Analysis and System Thermodynamics (BLAST) Users Manual Volume One Supplement (Version 3.0)*.
- [37] – *The Home of DOE-2 based Building Energy Use and Cost analysis Software*, DOE-2. [online] Disponível em: <https://www.doe2.com/> (acedido a 21/09/2024)
- [38] – *Transient System Simulation Tool*, TRNSYS. [online] Disponível em: <https://www.trnsys.com/> (acedido a 21/09/2024)
- [39] – *EnergyPlus, Energyplus*. [online] Disponível em: <https://energyplus.net/> (acedido a 21/09/2024)
- [40] – *Design Builder Software Ltd, Design Builder V.7.3.0.27* (2024)

- [41] – Rahman, M.M., Rasul, M.G. & Khan, M.M.K. (2008). *Energy conservation measures in an institutional building by dynamic simulation using DesignBuilder*.
- [42] – Blanco, J. M., Buruaga, A., Roji, E., Cuadrado, J., & Pelaz, B. (2016). *Energy assessment and optimization of perforated metal sheet double skin facades through design Builder; a case study in Spain*.
- [43] – Mustafaraj, G., Marini, D., Costa, A., & Keane, M. (2014). *Model calibration for building energy efficiency Simulation*.
- [44] – Abba, H. Y., Abdul Majid, R., Ahmed, M. H., & Ayegbusi, O. G. (2022). *Validation of DesignBuilder Simulation Accuracy using Field Measured Data of Indoor Air Temperatura in a Classroom Building*. Journal of Tourism, Hospitality and Environment Management.
- [45] - Lynn, T., Rosati, P., Kassem, M., Krinidis, S., & Kennedy, J. (2023). *Disrupting Buildings Digitalisation and the Transformation of Deep Renovation*.
- [46] – ASHRAE Standing Standard Project Committee 140. (2020). *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs, ANSI/ASHRAE Addendum a to ANSI/ASHRAE Standard 140-2017*.
- [47] – *Standards Used in DesignBuilder*, DesignBuilder. [online] Disponível em: <https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/Standards.htm> (acedido a 22/09/2024)
- [48] - *Lançando luz sobre a energia na europa*, Comissão Europeia & Eurostat. [online] Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2024#energy-consumption> (acedido a 10/05/2024)
- [49] - *Beginners: Energy flow*, Comissão Europeia & Eurostat. [online] Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Beginners:Energy\\_flows](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Beginners:Energy_flows) (acedido a 10/05/2024)
- [50] - *Sankey diagrams for energy balance*, Comissão Europeia & Eurostat. [online] Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Sankey diagrams for energy balance](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Sankey_diagrams_for_energy_balance) (acedido a 10/05/2024)
- [51] - *Energy balance flow for Portugal, 2022*, Comissão Europeia & Eurostat. [online] Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/energy/sankey.html?geos=PT&year=2022&unit=KTOE&fuels=TOTAL&highlight=&nodeDisagg=0101110001000&flowDisagg=true&translateX=-148.80516018546723&translateY=-222.07275175962138&scale=1.3058258773141391&language=EN> (acedido a 10/05/2024)

- [52] – *DesignBuilder v7 Help*, DesignBuilder. [online] Disponível em: [https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/index.htm#GetStarted.htm?TocPath=Get%2520Started%257C\\_\\_\\_\\_\\_0](https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/index.htm#GetStarted.htm?TocPath=Get%2520Started%257C_____0) (acedido a 10/02/2024)
- [53] - Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., & Pedersen, C. O. (2001). *EnergyPlus: New Capabilities in a Whole-Building Energy Simulation Program*.
- [54] – Heating Design Calculation, DesignBuilder v7 Help, DesignBuilder. [online] Disponível em: [https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/Heating\\_design\\_simulation.htm](https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/Heating_design_simulation.htm) (acedido a 10/02/2024)
- [55] – U.S. Department of Energy (2022) *Engineering Reference, EnergyPlus Version 22.1.1 Documentation*.
- [56] – Solar gain in buildings, Designing Buildings. [online] Disponível em: [https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Solar\\_gain\\_in\\_buildings](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Solar_gain_in_buildings) (acedido a 10/02/2024)
- [57] - Marino, C., Nucara, A., Francesca Panzera, M., & Pietrafesa, M. (2024). *Evaluating direct and diffuse solar radiation components through global radiation measurements from three fixed directions*.
- [58] - Direção Geral da Energia e Geologia. (2016). Software de cálculo SCE.CLIMA-Anos Meteorológicos de Referência, v1.0. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/sce-er/> Acedido a: 02/02/2024
- [59] - Walton, G. N. (1983). *Thermal Analysis Research Program Reference Manual. NBSSIR 83-2655. National Bureau of Standards (now NIST)*.
- [60] - Lawrence Berkeley Laboratory (LBL). (1994). *DOE2.1E-053 source code*.
- [61] - Yazdanian, M. and J. H. Klems. (1994). *Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings. ASHRAE Transactions*.
- [62] - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, A. Pina dos Santos, C., & Matias, L. (2006). *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios, versão atualizada 2006*.
- [63] – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (2014). *Folha de cálculo Rph-método simplificado, v2.0a. Versão de 2021 disponível em: https://www.lnec.pt/pt/servicos/ferramentas/br-aplicacoes/eficiencia-energetica/* Acedido a: 02/02/2024
- [64] – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021) *ASHRAE Handbook Fundamentals 2021, SI edition*.

- [65] – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (2013). *Software de cálculo Qventila, v01b. Versão de 2021 disponível em: <https://www.lnec.pt/pt/servicos/ferramentas/br-aplicacoes/eficiencia-energetica/>* (acedido a 20/04/2024)
- [66] – DesignBuilder Software Ltd. (2022). *Space-Heating Performance Tests HE100 to HE230.*
- [67] – DesignBuilder Software Ltd. (2022). *ASHRAE Standard 140-2020 Participating Organizations and Computer Programs for Quasi-Analytical Solutions and Example Simulation Results Section 5.4-HVAC Equipment Performance Tests HE100 through HE230.*
- [68] - Wang, R., Li, J., Ma, J., & Peng, W. (2022). *The characteristics of thermal environment and comfort of residential buildings during winter in hot summer and cold winter climate zone of china. E3S Web of Conferences.*
- [69] – *Termoacumulador 80l Videira*, NicolauRosa. [online]  
Disponível em: <https://www.nicolaurosa.com/termoacumuladores-videira/11680-termoacumulador-de-cobre-80-l-alta-pressao-multi-f-1500w-230v-vertical-parede-horizontal-solo-videira-5603480087643.html> (acedido a 11/08/2024)
- [70] – *Ar condicionado UI Monosplit, Capacidade 2,5/ 3,5 kW*, LG Electronics. [online]  
Disponível em: <https://www.lg.com/pt/ar-condicionado-residencial/ar-condicionado-residencial/s09et/> (acedido a 11/08/2024)
- [71] – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. (2024). Fichero Quadros de Tarifas Energia Elétrica vigentes a partir de 01 de janeiro de 2024 disponível em: <https://www.erse.pt/atividade/regulacao/tarifas-e-precos-eletricidade/> (acedido a 20/04/2024)
- [72] - Diário da República. (2021). Decreto-Lei n.º 102-D/2020.
- [73] – *Heating & Cooling Solutions UK, Aquarea High Performance Mono-bloc J Generation 1 Phase R32*, Panasonic Marketing Europe GmbH. [online]  
Disponível em: [https://www.aircon.panasonic.eu/GB\\_en/product/aquarea-high-performance-mono-bloc-j-generation-r32/](https://www.aircon.panasonic.eu/GB_en/product/aquarea-high-performance-mono-bloc-j-generation-r32/) (acedido a 11/08/2024)
- [74] – *Pellet Boilers, Lundy 8 – supply only*, Island Pellet Stoves. [online]  
Disponível em: <https://www.islandpelletstoves.co.uk/shop/pellet-boilers/lundy-8-supply-only/> (acedido a 11/08/2024)
- [75] – *Paleta Pellets*, Martos. [online] Disponível em: [https://www.martos.pt/loja/?srsltid=AfmBOorDPGhA6\\_cb1WvIGPhNARR8Y5FkH8n5qj8Slo6dztQz4MoflQuK&v=35357b9c8fe4](https://www.martos.pt/loja/?srsltid=AfmBOorDPGhA6_cb1WvIGPhNARR8Y5FkH8n5qj8Slo6dztQz4MoflQuK&v=35357b9c8fe4) (acedido a 11/08/2024)
- [76] - Diário da República, 2.ª série - N.º 122. (2008). *Despacho n.º 17313/2008 de 26 de junho de 2008.*

[77] – *Caldeira Mural de Condensação Lifestar Connect*, Vulcano – Bosch Termotecnologia S.A. [online]

Disponível em: <https://www.vulcano.pt/ocs/vulcano/caldeira-mural-de-condensacao-lifestar-connect-1098496-p/> (acedido a 11/08/2024)

[78] – *Preço regulado para GPL engarrafado*, Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. [online]

Disponível em: [https://www.erse.pt/media/qmofikfc/pre%C3%A7o-gpl-engarrafado\\_abril\\_2.pdf](https://www.erse.pt/media/qmofikfc/pre%C3%A7o-gpl-engarrafado_abril_2.pdf) (acedido a 11/05/2024)

[79] – *Gerador de Preços Portugal*, CYPE Ingenieros, S.A.. [online]

Disponível em: <https://geradordeprecos.info/> (acedido a 24/8/2024)

[80] – *Aquecimento- Recuperadores a lenha - Tejo*, Proteu. [online]

Disponível em: <https://proteu.pt/produto/tejo-recuperador-de-calor-a-agua/> (acedido a 11/08/2024)