

DM

Robustez da Certificação Energética dos Edifícios de Habitação em Portugal

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Roberto Manuel Fernandes Tomé

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

maio | 2021

Robustez da Certificação Energética dos Edifícios de Habitação em Portugal

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Roberto Manuel Fernandes Tomé

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO

José Manuel Martins Neto dos Santos

CO-ORIENTAÇÃO

Patrícia Carlota Costa Escórcio



ROBUSTEZ DA CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA DOS EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO EM PORTUGAL

Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para a obtenção de Grau de
Mestre em Engenharia Civil

Roberto Manuel Fernandes Tomé

(Licenciado em Engenharia Civil)

ORIENTADOR:

Doutor José Manuel Martins Neto dos Santos

CO-ORIENTADOR:

Doutora Patrícia Carlota Costa Escórcio

Funchal, maio 2021

Título: Robustez da Certificação Energética dos Edifícios de Habitação em Portugal

Palavras-chave: Análise Paramétrica; Análise de Robustez; Análise de Sensibilidade; Certificação Energética; Eficiência energética; Edifícios de Habitação; Metodologia de Cálculo do SCE.

Keywords: Parametric Analysis; Robustness Analysis; Sensitivity Analysis; Energetic certification; Energy efficiency; Housing Buildings; Calculation Methodology of SCE.

Autor: Roberto Manuel Fernandes Tomé

FCEE – Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

Campus Universitário da Penteada

9020 - 105 Funchal – Portugal, s/n

Telefone + 351 291 705 230

Correio eletrónico: gabinete@reitoria.uma.pt

Funchal, Madeira, Portugal

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais e namorada, pelo apoio, e incentivo prestado ao longo deste tempo de execução desta dissertação, pois sem eles isto teria sido uma tarefa inalcançável.

Ao meu orientador, Professor Doutor José Santos e a minha co-orientadora, Professora Doutora Patrícia Escórcio pelas suas orientações e disponibilidade prestada ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

E a outras pessoas, que de alguma forma, apoiaram para a realização desta dissertação.

RESUMO

Durante as últimas décadas, os países mais industrializados encontram-se numa competição por depender cada vez menos das energias de origem fóssil, mas o crescimento demográfico aliado ao crescimento económico e tecnológico não tem parado de correr também numa competição paralela. As nações mais organizadas encontram-se no processo de alcançar cada vez mais objetivos que permitam o consumo menor de energia e com isso reduzir também as emissões atmosféricas de gases de efeito de estufa, tudo isto apostando na eficiência energética e nas energias renováveis. O sector das edificações não é alheio a estos avanços, exigindo uma eficiência energética responsável às novas edificações e estimulando as edificações existentes a adotar melhorias. A União Europeia afirma nas suas diretivas que o sector dos edificios é responsável por 40% do consumo energético, pelo que propõe no âmbito deste sistema o aumento substancial da eficiência energética dos edificios, nomeadamente, implementando o Sistema de Certificação Energética.

A nível geral as exigências para alcançar uma eficiência energética elevada no parque edificado impõem o estudo das envolventes dos edificios, dos sistemas de acondicionamento do ar interior, ventilação, iluminação, entre outros. Exemplo destas exigências é dado pela UE que tem publicado diversas diretivas europeias às quais os estados-membros devem adaptar-se. Uma das diretivas mais importantes publicadas foi a Diretiva Europeia 2010/31/EU cuja adaptação em Portugal consiste no Decreto-Lei n.º 118/2013 (Sistema de Certificação Energética) o qual dá objeto de estudo a esta dissertação.

Coloca-se a questão de saber se o mesmo é suficientemente robusto tendo em conta as incertezas e a variabilidade de parâmetros existente em cada edificio. Assim, nesta dissertação pretende-se, através de análises estatísticas aplicadas a edificações reais, avaliar a robustez do sistema de certificação em edificios de habitação, usando a metodologia de cálculo imposta pelo Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH).

Com esse propósito, recorre-se a uma análise que envolve dois casos de estudo distintos (uma fração de um edificio multifamiliar e uma moradia unifamiliar isolada), ambos localizados na Região Autónoma da Madeira. Nestas habitações foram determinadas as classificações energéticas mediante a metodologia regulamentar para depois poder avaliar a variabilidade dos parâmetros mais influentes para a classificação final. Conclui-se que embora alguns parâmetros tenham uma variabilidade não desprezável, a metodologia de cálculo indicada no SCE é suficientemente robusta tendo em conta a baixa probabilidade de se obterem diferentes classes energéticas quando se efetuam variações de parâmetros que simulam as incertezas dos diversos parâmetros.

PALAVRAS-CHAVE: Análise Paramétrica; Análise de Robustez; Análise de Sensibilidade; Certificação Energética; Eficiência energética; Edifícios de Habitação; Metodologia de Cálculo do SCE.

ABSTRACT

During the last decades, the most industrialized countries find themselves in a competition for relying less and less on fossil fuels, but population growth combined with economic and technological growth has not stopped running in parallel competition as well. The most organized nations are in the process of reaching more and more goals that allow for lower energy consumption and with this also reduce atmospheric emissions of greenhouse gases, all this betting on energy efficiency and renewable energies. The building sector is not unaware of these advances, demanding responsible energy efficiency for new buildings and encouraging existing buildings to adopt improvements. The European Union states in its directives that the buildings sector is responsible for 40% of energy consumption, which is why it proposes, within the scope of this system, a substantial increase in the energy efficiency of buildings, namely, by implementing the Energy Certification System.

At a general level, the requirements to achieve high energy efficiency in the building stock require the study of building envelopes, indoor air conditioning systems, ventilation, lighting, among others. An example of these requirements is given by the EU, which has published several European directives to which member states must adapt. One of the most important directives published was the European Directive 2010/31/EU whose adaptation in Portugal consists of Decree-Law No. 118/2013 (Energy Certification System) which gives the object of study to this dissertation.

The question arises as to whether it is sufficiently robust taking into account the uncertainties and variability of parameters existing in each building. Thus, in this dissertation it is intended, through statistical analysis applied to real buildings, to evaluate the robustness of the certification system in residential buildings, using the calculation methodology imposed by the Regulation of Energy Performance of Residential Buildings (REH).

For this purpose, we resort to an analysis that involves two distinct case studies (a fraction of a multi-family building and a detached single-family house), both located in the Autonomous Region of Madeira. In these dwellings, energy ratings were determined using the regulatory methodology in order to later be able to assess the variability of the most influential parameters for the final classification. It is concluded that although some parameters have a non-negligible variability, the calculation methodology indicated in the SCE is sufficiently robust considering the low probability of obtaining different energy classes when performing parameter variations that simulate the uncertainties of the various parameters.

KEYWORDS: Parametric Analysis; Robustness Analysis; Sensitivity Analysis; Energetic certification; Energy efficiency; Housing Buildings; Calculation Methodology of SCE.

INDICE GERAL

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xv
Nomeclatura.....	xvii
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização da dissertação.....	2
2 Certificação Energética de edificios.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Impacto ambiental dos edificios.....	6
2.3 Impacto económico e energético dos edificios.....	10
2.4 Medidas adotadas pela EU e Portugal para o melhoramento da eficiência energética.....	13
2.5 Certificação energética dos edificios.....	18
2.6 Progressos obtidos.....	21
3 Sistema de Certificação energética em Portugal.....	25
3.1 Introdução.....	25
3.2 Regulamentação.....	26
3.3 Metodologia de Cálculo.....	31
3.3.1 Necessidades nominais anuais de energia primária.....	32
3.3.2 Comportamento da habitação durante a estação de aquecimento.....	33
3.3.3 Comportamento da habitação durante a estação de arrefecimento.....	36
3.3.4 Necessidades energéticas para a preparação de águas quentes sanitárias.....	38
3.3.5 Necessidades energéticas para ventilação mecânica.....	39
3.3.6 Energias produzidas por fontes renováveis.....	39
3.4 Ferramentas de cálculo para a obtenção de determinados parâmetros.....	40
3.5 Ferramentas de cálculo para apoio à metodologia de cálculo do SCE.....	41

4	Análise estatística na engenharia.....	43
4.1	Conceitos gerais	43
4.1.1	Variáveis aleatórias	43
4.1.2	Medidas descritivas populacionais	44
4.1.3	Funções de distribuição correntes de variáveis aleatórias	46
4.1.4	Método de Monte Carlo.....	48
4.2	Tipos de análises	49
4.2.1	Análise de Sensibilidade.....	49
4.2.2	Análise Paramétrica.....	50
4.2.3	Análise de Robustez	50
4.3	Resultados sobre pesquisas estatísticas na certificação energética de edifícios.....	52
5	Casos de estudo	57
5.1	Introdução	57
5.2	Descrição sumária dos Edifícios	57
5.2.1	Habitação M1	58
5.2.2	Habitação A1	59
5.3	Classificação Energética dos Edifícios	60
5.3.1	Habitação M1	60
5.3.2	Habitação A1	68
5.4	Indicações Finais.....	73
6	Análise Estatística do SCE.....	75
6.1	Introdução	75
6.2	Análise Paramétrica	76
6.2.1	Análise ao coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca.....	76
6.2.2	Análise ao coeficiente de transmissão térmica da envolvente envidraçada.....	78
6.2.3	Análise das renovações de ar R_{ph} (h^{-1})	80
6.2.4	Análise da Altitude e Localização Geográfica	81
6.2.5	Análise dos Sistemas Técnicos.....	84
6.2.6	Análise do Fator de Sombreamento por Elementos no Horizonte (F_h) da Edificação	87
6.2.7	Análise da Orientação das Habitações.....	88

6.2.8	Análise na Variação de Áreas interior útil de pavimento (A_p).....	89
6.3	Análise de Sensibilidade	91
6.3.1	Parâmetros analisados	91
6.3.2	Dispersão de parâmetros	92
6.3.3	Análise.....	93
6.4	Análise de Robustez.....	94
7	Conclusões e desenvolvimentos futuros	97
7.1	Conclusões	97
7.2	Desenvolvimentos Futuros.....	99
	Referencias bibliográficas	101
	Anexos.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Emissão GEE na EU: a) por setor económico, b) por tipo de gás (adaptado de [2]).....	1
Figura 2 - Temperatura de sobreaquecimento atual e previsões até 2100 [6]	7
Figura 3 - População mundial atual e projeções futuras, adaptada de [10].....	9
Figura 4 - Emissões de GEE por setor 2014, adaptada de [1]	9
Figura 5 - Evolução das Emissões de GEE em Portugal [14]	10
Figura 6 - Processo simplificado do fabrico do cimento [15]	10
Figura 7 - Características térmicas das edificações portuguesas, adaptado de [18]	11
Figura 8 - Ciclo de uso de energia de um edifício [20].....	12
Figura 9 - Evolução da legislação portuguesa consoante a Diretiva (EPBD) [28].....	16
Figura 10 - Análise de indicadores energéticos e classificação final, adaptado de [34]	21
Figura 11 - Consumo de Energia Primária [37]	22
Figura 12 - Imagem do Satélite Sentinel-5P que mostra a poluição do ar na europa [40]	24
Figura 13 - Gastos mensais por serviço, adaptado de [42].....	24
Figura 14 - Diferentes tipos de edifícios com elevada eficiência energética [46].....	27
Figura 15 - Necessidades Energéticas, adaptado de apontamentos de Física das construções	28
Figura 16 - Sínteses dos diplomas que completam o SCE, adaptado de [56]	30
Figura 17 - Esquema do desempenho energético do edifício real, adaptado de [58]	33
Figura 18 - Esquema do balanço energético na estação de aquecimento [58]	34
Figura 19 - Esquema de coeficientes de determinação de perdas pela envolvente [58]	35
Figura 20 - Transferência de calor das envolventes na estação de arrefecimento, adaptado de [58].....	37
Figura 21 - Estrato de simulação de desempenho de sistema solar térmico, de SCE.ER	40
Figura 22 - Determinação de parâmetros de ganhos e perdas com folha de cálculo [64]	42
Figura 23 - Representação esquemática de variáveis aleatórias (X) [66]	44
Figura 24 - Apresentação gráfica das variáveis aleatórias [67].....	44
Figura 25 - Histograma com a localização da média [186].....	45
Figura 26 - Intervalo da amostra [66].....	46
Figura 27 - Curva normal ou de Gauss [66].....	47
Figura 28 - Simetria da curva de Gauss [66].....	47
Figura 29 - Distribuição log-normal com diferentes valores de (μ) e (σ) [71].....	48
Figura 30 - Diferentes variações de desempenho de um modelo, adaptado de [77]	52
Figura 31 - Documentação necessária para a emissão do CE [152].....	58

Figura 32 - Plantas da habitação M1, à esquerda o Piso -1 e à direita o Piso 0.....	59
Figura 33 - Planta da fração em estudo	60
Figura 34 - Identificação de envolventes da Habitação M1	62
Figura 35 - Envolventes da habitação A1	69
Figura 36 - Indicadores relevantes por estação da Habitação M1	75
Figura 37 - Indicadores relevantes por estação da Habitação A1	76
Figura 38 – Desenvolvimentos após variação do coeficiente U das EO na habitação M1.....	77
Figura 39 – Desenvolvimentos após variação do coeficiente U das EO na habitação A1	78
Figura 40 - Energia primaria por variação de U na habitação A1	78
Figura 41 – Desenvolvimentos após variação do coeficiente U dos VE na habitação M1	79
Figura 42 – Desenvolvimentos após variação do coeficiente U dos VE na habitação A1	80
Figura 43 - Variações das renovações de ar na habitação M1.....	80
Figura 44 - Variações das renovações de ar na habitação A1	81
Figura 45 - Variações da altitude do local na habitação M1	82
Figura 46 - Variações da altitude do local na habitação A1	82
Figura 47 - Variações da Localização Geográfica da Habitação M1	83
Figura 48 - Variações da Localização Geográfica da Habitação A1	83
Figura 49 - Alteração de sistemas técnicos de AQS na habitação M1	85
Figura 50 - Alteração de sistemas técnicos de AQS na habitação A1	85
Figura 51 - Alteração de sistemas técnicos de aquecimento de ar na habitação M1	86
Figura 52- Alteração de sistemas técnicos de aquecimento de ar na habitação A1.....	86
Figura 53 - Variações do fator F_h da Habitação M1	88
Figura 54 - Variações do fator F_h da Habitação A1.....	88
Figura 55 - Variações de rotação da orientação da Habitação M1	89
Figura 56 - Variações de rotação da orientação da Habitação A1.....	89
Figura 57 - Variações percentuais das áreas dos elementos da habitação M1	90
Figura 58 - Variações percentuais das áreas dos elementos da habitação A1	90
Figura 59 - Exemplo do consumo energético anual por variações de áreas na habitação M1	91
Figura 60 - Apresentação percentual do coeficiente de sensibilidade de cada parâmetro.....	93
Figura 61 - Estabilização de resultados de R_{Nt} da habitação A1: a) média e b) desvio padrão	94
Figura 62 - Estabilização de resultados de R_{Nt} da habitação M1: a) média e b) desvio padrão	94
Figura 63 - Distribuição de dados simulados das habitações: a) A1 e b) M1.....	95
Figura 64 - Probabilidade de as habitações adotar diferentes classes energéticas.....	95
Figura 65 - Cenários para determinação de probabilidade, Habitação M1	96

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Metas nacionais de Portugal para o horizonte 2030, adaptado de [31].....	17
Tabela 2 - Definição da classe energética de acordo com o rácio R_{Nt} , adaptado de [33].....	21
Tabela 3 - Expressões de valor medio e variância	45
Tabela 4 - Medidas descritivas para distribuição uniforme	46
Tabela 5 - Resumo de características da habitação M1.....	59
Tabela 6 - Resumo de características da habitação A1	60
Tabela 7 - Parâmetros climáticos da estação de aquecimento da habitação M1	61
Tabela 8 - Parâmetros climáticos da estação de arrefecimento da habitação M1	61
Tabela 9 - Áreas e pés direitos dos compartimentos da habitação M1	61
Tabela 10 - Resumo de áreas (m^2) de elementos verticais da habitação M1.....	61
Tabela 11 - Resumo de características de materiais das paredes exteriores da habitação M1	63
Tabela 12 - Resumo de características de materiais da cobertura exterior da habitação M1	63
Tabela 13 - Elementos exteriores da habitação M1	63
Tabela 14 - Resumo de parâmetros de elementos envidraçados da habitação M1.....	64
Tabela 15 - Características por tipo de vão envidraçado da habitação M1	64
Tabela 16 - Resumo de PTL exteriores da habitação M1	64
Tabela 17 - Coeficientes de redução de perdas da garagem da habitação M1	65
Tabela 18 - Resumo de PTL interiores da habitação M1	65
Tabela 19 - Resumo de áreas de elementos do envolvente interior com requisitos da habitação M1....	65
Tabela 20 - Resumo de ventilação da habitação M1	66
Tabela 21 - Características dos Sistemas Técnicos da habitação M1	66
Tabela 22 - Resultados da estação de aquecimento da habitação M1	67
Tabela 23 - Resultados da estação de arrefecimento da habitação M1	67
Tabela 24 - Parcela de balanço energético de AQS e aproveitamento de Eren da habitação M1	67
Tabela 25 - Necessidades nominais de energia primária da habitação M1	67
Tabela 26 - Parâmetros da estação de aquecimento da Habitação A1	68
Tabela 27 - Parâmetros da estação de arrefecimento da Habitação A1	68
Tabela 28 - Resumo das áreas da envolvente horizontal da habitação A1.....	68
Tabela 29 - Resumo de áreas das envolventes verticais da habitação A1.....	68
Tabela 30 - Resumo de características de materiais da parede exterior da habitação A1	69
Tabela 31 - Parâmetros da envolvente exterior da habitação A1	69

Tabela 32 - Resumo de PTL exteriores da habitação A1	70
Tabela 33 - Resumo de parâmetros por V.E. da habitação A1	70
Tabela 34 - Características dos tipos de V.E. da habitação A1	70
Tabela 35 - Parâmetros térmicos da envolvente interior da habitação A1	71
Tabela 36 - PTL interior do ENU da habitação A1	71
Tabela 37 - Resultados da estação de aquecimento da habitação A1	72
Tabela 38 - Resultados da estação de arrefecimento da habitação A1	72
Tabela 39 - Parcela de balanço energético de AQS e aproveitamento de Eren da habitação A1	73
Tabela 40 - Resultado final das necessidades nominais de energia primária da habitação A1	73
Tabela 41 - Valor médio do coeficiente U opaco da habitação M1	77
Tabela 42 - Valor médio do coeficiente U opaco da habitação A1	77
Tabela 43 - Valor médio do coeficiente U dos VE da habitação M1	79
Tabela 44 - Valor médio do coeficiente U dos VE da habitação A1	79
Tabela 45 - Sistemas técnicos adotados para variações de AQS.....	84
Tabela 46 - Sistemas técnicos adotados para variações de aquecimento de ar interior	85
Tabela 47 - Dispersão adotada para os parâmetros em estudo	93
Tabela 48 - Diferenças do R_{Nt} real e médio de ambas habitações.....	94
Tabela 49 - Probabilidade de obter uma classe energética por cenários	96

NOMENCLATURA

CO₂	Dióxido de carbono
R	Resistência térmica
T	Temperatura
h	Coefficiente de transferência de calor
U	Coefficiente de transmissão térmica
ψ	Coefficiente de transmissão térmica linear
b_{tr}	Coefficiente de redução de perdas de espaços não úteis
R_{Nt}	Rácio de classe energética
N_{te}	Necessidades nominais anuais de energia primária do edifício real
N_t	Necessidades nominais anuais de energia primária de referência
N_{ic}	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do edifício real
N_i	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento de referência
N_{ve}	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento do edifício real
N_v	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento de referência
Q_{tr}	Transferência de calor por transmissão
Q_{ve}	Transferência de calor por ventilação
Q_{gu}	Ganhos térmicos úteis
Q_g	Ganhos térmicos brutos
A_p	Área de pavimento
η	Fator de utilização de ganhos / Eficiência de sistemas técnicos
M	Duração média da estação convencional
L_v	Duração da estação de arrefecimento
I_{sol}	Radiação solar média correspondente à radiação incidente numa superfície orientada a oeste
Q_a	Necessidades de energia útil para preparação de AQS
E_{ren}	Energia renovável
F_{pu}	Fator de conversão de energia
GD	Grau-dia
Θ_{ext,v}	Temperatura média exterior de verão
α	Declive
z	Altitude
H_{adj}	Coefficiente de transferência de calor através da envolvente em contacto com edifícios adjacentes

H_{ecs}	Coeficiente de transferência de calor através de elementos em contacto com o solo
H_{enu}	Coeficiente de transferência de calor da envolvente em contacto com espaços não úteis
H_{ext}	Coeficiente de transferência de calor através da envolvente em contacto com o exterior
H_{tr}	Coeficiente de transferência de calor por transmissão
H_{ve}	Coeficiente de transferência de calor por ventilação
R_{ph}	Renovações de ar por hora
I_t	Inércia térmica
g	Fator solar dos envidraçados
W_{vm}	Energia elétrica necessária ao funcionamento dos ventiladores
α	Coeficiente de absorção de radiação solar por uma superfície opaca
γ	Parâmetro adimensional da razão de balanço térmico
δ	Fator adimensional que representa as condições em que o risco de sobreaquecimento
A	Áreas
D	Dimensões
H	Altura

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

Devido à problemática mundial que é o aquecimento global as nações tentam reduzir as emissões de gases que produzem o efeito estufa, sendo, um dos mais destacados o CO₂ como se apresenta na Figura 1.b devido às quantidades que se geram pela atividade humana (Figura 1.a) e pela sua permanência na capa atmosférica, causando danos praticamente irreversíveis no ecossistema. A recomendação exposta no quinto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) após conhecer o impacto climático mundial é a redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) em 70% até 2050 e em 100% para 2100. [1]

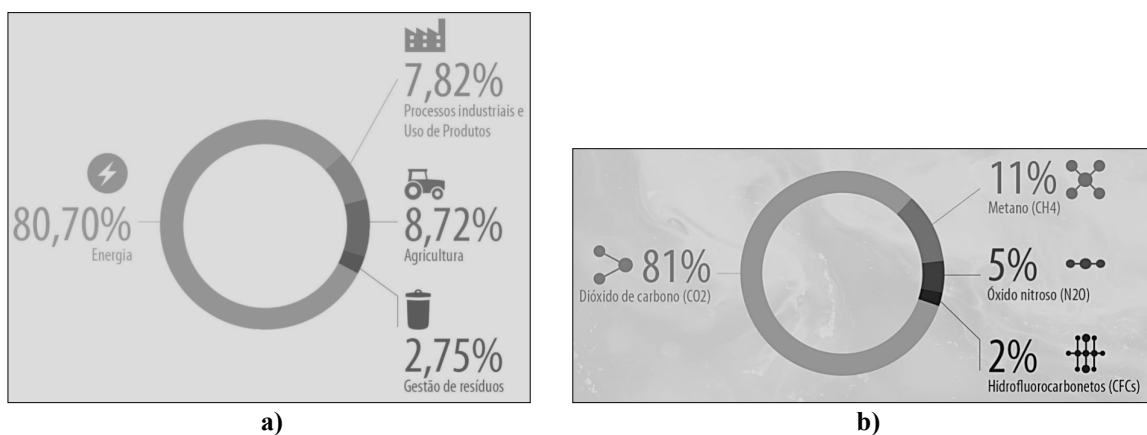


Figura 1 - Emissão GEE na EU: a) por setor económico, b) por tipo de gás (adaptado de [2])

Segundo a Diretiva UE 2018/844 o parque edificado na Europa é responsável por 40% do consumo da energia final o que se traduz em mais de 35% das emissões de GEE, estando aqui a necessidade de descarbonização deste setor.

Desde 2002, o Parlamento Europeu exige (Diretiva 2002/91/CE) aos estados-membros a implementação de certificados que indiquem as qualidades térmicas das edificações e a qualificação da eficiência nos consumos de energia, de forma, a que todos os usuários ou novos utilizadores conheçam a qualidade energética da fração, incentivando, a este, a ser um fator importante na hora de comprar ou arrendar o imóvel.

A UE pretende reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono por meio da melhoria da eficiência energética em pelo menos 40% para 2030 segundo a Diretiva (UE) 2018/2002. A diretiva mais atual em matéria de certificação energética é a Diretiva (UE) 2018/844 a qual indica que a renovação energética em edifícios deve avançar numa taxa de 3% anual para edifícios com necessidades

quase nulas de energia. É importante mencionar que Portugal está em processo de adaptação para esta diretiva com o Decreto-Lei nº 101-D/2020.

Para a data de desenvolvimento desta dissertação o diploma em vigor que expressa a metodologia de certificação energética de edifícios é o Decreto-Lei n.º 118/2013 SCE com o que Portugal pretende qualificar e regular a eficiência energética e as condições térmicas dos espaços interiores edificados. Especificamente para edifícios destinados à habitação, o diploma que regulamenta o desempenho energético é o Regulamento dos Edifícios de Habitação (REH) estudado nesta dissertação.

Os responsáveis por aplicar a metodologia de cálculo indicada no Sistema de Certificação Energética (SCE) são os peritos qualificados (PQ) pela Agência para a Energia (ADENE), mas estes podem no processo de aplicação da metodologia de cálculo encontrar-se com numerosas incertezas na determinação de parâmetros, em especial, nos edifícios existentes ou em edifícios construídos com desconformidade aos projetos. Dito isto, é evidente a variabilidade de resultados paramétricos que se podem apresentar num determinado caso e por consequência pode ver-se afetada a classificação energética final de uma habitação.

Tomando em conta a situação acima mencionada se apresenta a preocupação de conhecer a robustez da metodologia de cálculo da certificação energética de edifícios de habitação: a adaptação dos resultados a uma série de imprevistos e a sua classificação final consoante a realidade física.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação consiste em avaliar a robustez da certificação energética dos edifícios de habitação em Portugal. Para satisfação deste objetivo principal propõem-se os seguintes objetivos parciais:

- Efeituvar uma revisão bibliográfica e regulamentar;
- Estudar e aplicar a metodologia de cálculo do SCE a edifícios de habitação existentes;
- Explorar as ferramentas de cálculo mais comumente utilizadas pelos peritos qualificados;
- Realizar uma Análise Paramétrica da metodologia de cálculo para identificar a evolução da classificação conforme a variabilidade de parâmetros;
- Realizar Análise de Sensibilidade dos parâmetros para detetar os parâmetros mais influentes na classificação final;
- Realizar Análise da Robustez da metodologia de cálculo para perceber a estabilidade face às incertezas possíveis.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação será constituída por sete capítulos, incluindo o presente capítulo, a Introdução.

No Capítulo 2 é feita uma abordagem à Certificação Energética de Edifícios de Habitação, referindo legislação nacional e internacional, a importância do tema e uma visão futura do mesmo.

No Capítulo 3 é aprofundada a Certificação Energética em Portugal, através da legislação, metodologia de cálculo e ferramentas de cálculo.

No Capítulo 4 abordam-se conceitos estatísticos relevantes para as análises do Capítulo 6.

No Capítulo 5 caracterizaram-se as edificações a ser estudadas e são determinadas os seus desempenhos térmicos e energéticos mediante a aplicação da Metodologia de Cálculo do SCE.

No Capítulo 6 são apresentadas as distintas análises estatísticas de modo a avaliar a robustez da metodologia de cálculo e a importância dos vários parâmetros.

Por fim, no Capítulo 7, serão expostas as conclusões do trabalho realizado na presente dissertação, seguido de algumas recomendações para trabalhos futuros nesta área.

Capítulo 2

CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

Seguidamente do desenvolvimento do enquadramento do tema, pretende-se fornecer neste capítulo dados importantes sobre o consumo energético e a contaminação que podem produzir as edificações. Também pretende-se abordar os programas nacionais destinados a resolver esta situação até as bases do desenvolvimento da certificação energética de edifícios, por último apresentar os progressos nacionais após aplicação dos programas para obter um visual da eficiência das medidas.

2.1 INTRODUÇÃO

Devido a uma série de exigências impostas legislativamente, nasce a necessidade de certificar a eficiência energética das edificações, sendo este, um dos setores com maior potencial para a poupança de energia. Segundo as Diretivas Europeias, com o objetivo de avaliar todas as medidas implementadas no que refere ao consumo de energia e emissões de GEE por climatização, ventilação, iluminação e aquecimento de águas sanitárias para uma condição favorável no que refere à etapa de utilização ou serviço. Mas a certificação energética não só fornece uma qualificação por consumo de energia, também possui outras características importantes, tais como: a recomendação de medidas que melhorem as condições de eficiência energética, conforto térmico e a saúde das pessoas que exploram os fogos em análise, permitindo também conhecer uma previsão de consumo, o que se transforma em estimativas de gastos, e segundo as políticas governamentais de cada nação até pode permitir benefícios fiscais, etc.

Em Portugal os certificados podem ser classificados em dois tipos, um para edifícios de habitação e outro para edifícios de serviço, tendo como principal diferença que para edifícios de habitação cada fração deve ser certificada de modo independente, e nos edifícios de serviço a certificação pode ser global, desde que o sistema de acondicionamento do ar seja geral para toda a edificação.

O processo de certificação implementa a necessidade de analisar diversos fatores que permitem a obtenção de uma qualificação objetiva com níveis de confiança altos, alguns destes fatores são:

- Características da edificação (volumetria, superfície, materiais aplicados e métodos construtivos);
- Zona climática (climas quentes, frios, etc.);
- Equipamentos instalados destinados à aquecimento e arrefecimento do ar e ao aquecimento de águas sanitárias;
- Envolvente da estrutura (isolamento e permeabilidade);
- Tipo de ocupação da edificação (habitação, serviços);

- Energias utilizadas (convencionais, renováveis, etc.).

O objetivo da certificação energética é que seja determinante para os utilizadores no futuro na eleição de uma edificação ou fração no momento de venda ou arrendamento, através do conhecimento transparente da qualidade térmica e informação de consumo energético do mesmo. O resultado dos indicadores energéticos deve ser apresentado numa etiqueta energética com uma qualificação que pode variar segundo as legislações aplicadas nos diferentes países [3, 4]. Os edifícios serão certificados conforme a definição legal da fração outorgada pelas entidades oficiais.

2.2 IMPACTO AMBIENTAL DOS EDIFÍCIOS

Para começar esta secção é importante perceber o conceito de aquecimento global, este se desenvolve quando a radiação do sol alcança o planeta terra e parte da energia térmica liberada é absorvida pelo próprio, sendo o resto refletido para o espaço. Quando as massas oceânicas e terrestres são aquecidas o suficiente estas emitem também radiação a qual deve sair da atmosfera dissipando-se no espaço, mas é aqui que acontece o fenómeno que provoca o sobreaquecimento. Devido às atividades humanas que requerem o consumo de energia à qual é alimentada pela queima de combustíveis fósseis emitindo uma série de gases (GEE). É este efeito estufa que não permite a saída da radiação térmica do planeta devido a uma capa espessa que se forma na atmosfera e que por sua vez reflete novamente parte dessa energia para a superfície terrestre causando o sobreaquecimento do planeta, que como consequência está produzindo mudanças alarmantes no que se refere ao clima, ao ecossistema e à biodiversidade, efeitos sobre o mar, poluição, saúde, produção alimentar e por contrapartida danos a nível económico, social e cultural.

Na década dos anos 80 o aumento da temperatura terrestre segundo a avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (PIMC) incrementava em 0,5 °C e isto pelo desenvolvimento industrial que as nações tinham alcançado, produto das emissões de gases de efeito estufa que causam um aquecimento antropogénico. Segundo PIMC o planeta não deveria superar um aquecimento de 1,5 °C, para evitar fortes ondas de calor e precipitações intensas, segundo peritos do PIMC atualmente já foi alcançada a barreira de 1 °C pelo que se estima alcançar o limite para o ano 2040 como se apresenta na (Figura 2). [80] É importante mencionar que 197 nações assinaram em 2016 o chamado “Acordo de Paris” onde comprometeram-se a diminuir as emissões de GEE a partir de 2020 para evitar um sobreaquecimento que ultrapasse os 2 °C com o compromisso de limitar-se até 1,5 °C.[5]

Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) em 2004 nos países desenvolvidos o consumo de energia dos edifícios representava emissões de CO₂ de quase 50% das emissões totais e que entre 30% a 40% das mesmas tinham origem em combustíveis fósseis maioritariamente no uso de gás natural em atividades essenciais como o aquecimento e a queima de matérias-primas para a produção de eletricidade. A Comissão Europeia executou um estudo com base na análise de numerosas investigações importantes no ano 2006 sobre os setores que atentavam com a qualidade do ambiente onde resultaram as categorias com maior impacto como: o sector da alimentação

ou transporte e a habitação, revelando mais de 70% de responsabilidade no impacto ambiental europeu e representando mais de 60% das despesas de consumo. [6]

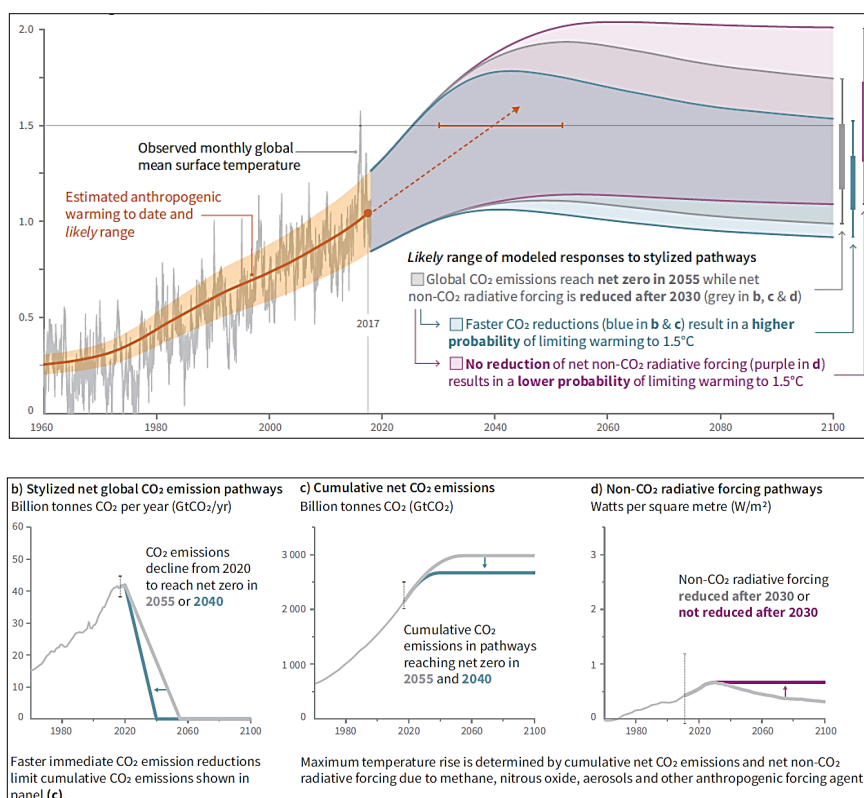


Figura 2 - Temperatura de sobreaquecimento atual e previsões até 2100 [7]

Afinando um pouco a investigação e centrando mais no setor da edificação, pode-se referir que no ciclo de vida do edifício estão claramente repartidas as fases de consumo e poluição do mesmo, pelo que, o impacto ambiental que gera pode ser caracterizado em três tipos: [8]

- O consumo energético (sendo o ponto mais desenvolvido nesta investigação): provenientes de emissões de gases de efeito estufa;
- O não gasto energético: como a geração de resíduos;
- Os que concebem mudanças diretas no ecossistema: como a desflorestação e outros processos definitivos.
- Voltando ao ciclo de poluição das edificações pode-se caracterizar estas em cinco etapas e todas com um peso importante na alteração climática:
- Etapa de planificação e projetos: na fase do estudo da viabilidade material e económica do projeto são analisados numerosos fatores, mas um dos mais importantes tem a ver com o local de implantação já que o uso apropriado do terreno é necessário para lograr um bom desempenho da estrutura e uma prolongada vida útil. Já na fase de projeto são planificadas etapas importantes para uma construção eficiente e económica e uma fase operativa de qualidade, conforto e segurança. Em ambas as fases já se conferem uma série de impactos relacionados ao levantamento de informação do local e a conceção da estrutura, como por exemplo, o consumo de transporte para o deslocamento ao local em estudo ou equipamentos para a realização de estudos e ensaios específicos como os

gastos operacionais de escritórios onde se desenvolve o trabalho dos técnicos, consumos de baixa relevância, mas não desprezáveis.

- Etapa de construção: refere-se à fase de produção física do concebido na fase de projeto e pode ser uma das mais poluentes se avaliarmos a duração da mesma. O planeamento das diferentes atividades necessárias para desenvolver esta etapa representa um ponto relevante para conquistar um desempenho económico e eficaz, sendo que aqui os impactos ambientais são numerosos e significativos e por vezes difíceis ou impossíveis de controlar. Podem-se destacar a extração de matérias-primas necessárias para subministrar energia à obra (combustíveis fósseis) como também para a fabricação de matérias de construção (agregados, madeiras, etc.) a utilizar, são destacáveis a quantidade de resíduos originados e as intervenções irremediáveis nas capas vegetais (desmatamentos), e também devem ser tomados em conta a utilização de substâncias químicas perigosas que podem contaminar drasticamente os terrenos e as águas subterrâneas.
- Etapa operativa (utilização/exploração): a fase mais extensa quanto ao tempo e onde se registam os maiores consumos, mais inclinados ao setor energético e ao consumo de água, embora os impactos não sejam tão bruscos como na fase anterior, são constantes durante grandes períodos de tempo pelo que é analisada a duração dos gases de efeito estufa na atmosfera, esta sem dúvida seria a fase mais agressiva para o meio ambiente, a procura desta fase se concentra nas necessidades de iluminação, ventilação, regulação da temperatura do ar e da água e adução e escoamento de águas.
- Fase de manutenção ou reabilitação: esta fase pode ocorrer muitas vezes durante a etapa operativa da edificação devido a causas como: correção de falhas da etapa anterior, mudança de utilização da edificação, manutenção e reparação de equipamentos, desastres naturais ou fim da vida útil da edificação podendo ser parcial ou definitiva. Aqui os impactos ambientais ganhariam importância conforme a complexidade e durabilidade da intervenção necessária sendo a utilização de energia o consumo mais significativo.
- Fase de desconstrução ou demolição: fim da vida útil da edificação onde os impactos ambientais estão mais inclinados à geração de resíduos. Já o consumo de energias pode variar segundo a técnica de desconstrução aplicada, podendo ser esta do tipo mecânico onde a utilização de energia para equipamentos seria superior à necessária como por exemplo à utilização de explosivos.

Segundo a “Base de Dados Portugal Contemporâneo” o setor da construção é um dos mais ativos na Europa com quase 30% para 2007 e também emprega quase 8% da população. Segundo [P. Torgal, S. Jalali] [9], o setor da construção é o maior consumidor de matérias primas a nível mundial com cerca de 300 Mt/por ano, por outra parte as Nações Unidas estimam (Figura 3) que para 2060 a população terá um crescimento demográfico de 2 mil milhões de pessoas e de 3 mil milhões para 2100 o que sem dúvida incrementará significativamente a procura de energia e a dinamização do sector da construção.

Para 2010 como se refere na (Figura 4) o aumento de emissões de GEE mundial representava 49 Gt CO₂-e dividido entre os setores da produção de energias com 35%, a indústria com 21%, o transporte

com 14% e as edificações com 6,4% (dados do PIMC) por emissões diretas, se falarmos em emissões indiretas (consumidores de energia final) o setor da indústria e a edificação são os principais emissores.

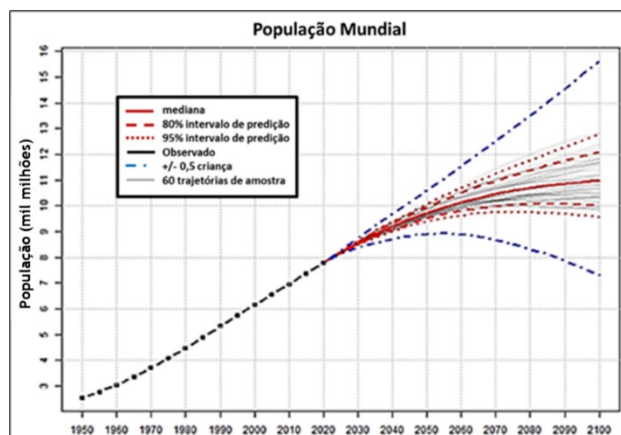


Figura 3 - População mundial atual e projeções futuras, adaptada de [10]

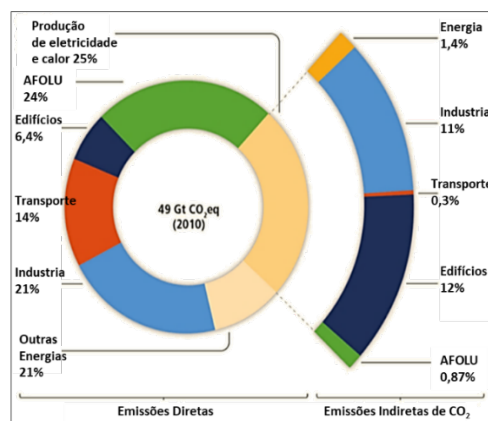


Figura 4 - Emissões de GEE por setor 2014, adaptada de [1]

Segundo o relatório especial do Tribunal de Contas Europeu 2019 a União Europeia (EU) possui o 6,9% da população mundial e emitem pouco mais de 8% dos GEE do planeta, segundo a DIRECTIVA 2010/31/EU os edifícios consomem pelo menos 40% da energia final da EU e segundo o Acordo de Paris 2015 50% dessa energia é utilizada para o condicionamento do ar (aquecimento/arrefecimento) do qual os edifícios se favorecem em 80% da totalidade. [11]

Segundo o Acordo Nacional de Emissões (Protocolo de Quioto) Portugal em 2012 emitiu GEE de aproximadamente 69 Mton CO₂e sendo o setor energético responsável de quase 70% das mesmas, e as edificações representavam 30% do consumo energético do qual 60% era destinado à energia final (eletricidade). Para a Comissão das Alterações Climáticas do Ministério do Ambiente, Portugal conseguiu enquadrar-se ao estabelecido no Protocolo de Quioto onde não lhe era permitido exceder as emissões de GEE em mais de 382 Mton CO₂e para o período (2008/2012) conseguindo melhorar o compromisso em menos 26,58 Mton CO₂e. [12]

Em 2017 como se apresenta na (Figura 5) as emissões de GEE aumentaram chegando a 70,8 Mt sendo o setor da energia responsável de 70% dessas emissões. Estudando as emissões totais por habitante, Portugal situa-se no 7º lugar dos países com menores emissões de carbono da EU com aproximadamente 298 t CO₂e / GWh somente no sector electroprodutor. [13]

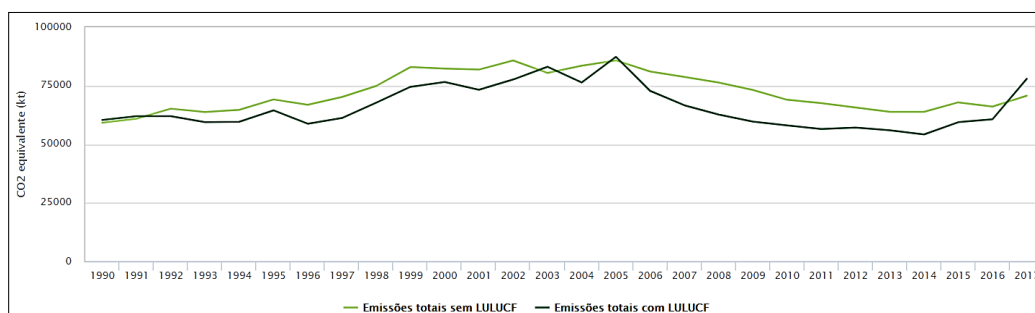


Figura 5 - Evolução das Emissões de GEE em Portugal [14]

Existe outro grande emissor de GEE associado às edificações, não tendo propriamente a ver com a procura de necessidades energéticas, mas sim muito relacionado com a construção em geral. O fabrico de cimento (Figura 6) a nível mundial é responsável pela produção de 8% das emissões de GEE totais, sem contar com a geração de resíduos com origem neste material que só na Europa é a responsável de 1/3 da produção de resíduos. O betão ainda representa o principal material de construção no mundo devido às suas características moldáveis e durabilidade pelo que 80% das emissões de CO₂ do setor da construção tem origem na produção de cimento, e podem ser classificadas em três fases como: a descarbonatação do calcário, a queima de combustíveis necessários para alimentar os fornos com uma temperatura de chama de 2000 °C, e o transporte destinado à distribuição do material. [15]

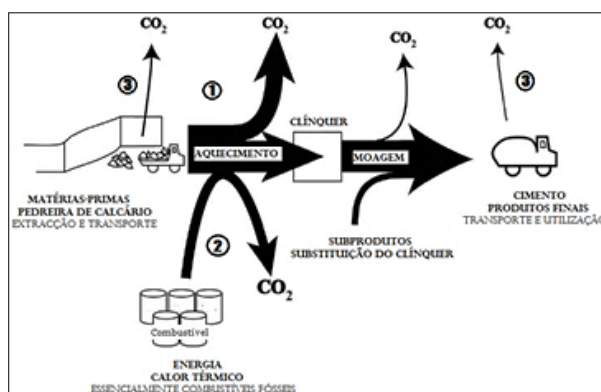


Figura 6 - Processo simplificado do fabrico do cimento [15]

2.3 IMPACTO ECONÓMICO E ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS

Em primeiro lugar é importante definir o conceito de eficiência energética (EE) que não é mais que a boa racionalização do uso da energia para produzir a maior quantidade de serviço possível, isto só é possível mediante dois fatores: a criação de novas tecnologias que oferecem sistemas mais eficientes, ou através de medidas que permitem a poupança da energia. A aplicação deste conceito em prática permite de forma positiva melhoras nas políticas económicas através da diminuição de dependência energética e alterações ambientais devido a redução de emissões de GEE. A eficiência energética não deve ser vista como simplesmente uma poupança de energia, pelo contrário este conceito vai mais encaminhado à otimização pelo que viria a ser uma poupança de energia sem reduzir a quantidade de serviço necessário e por vezes até representando o aumento de atividade. [16]

A avaliação da eficiência energética tem uma participação importante no desenvolvimento de políticas energéticas, isto só é possível através do estudo de desempenhos energéticos de determinados sistemas ou dispositivos. A metodologia mais utilizada é a comparação com tecnologias existentes embora também existam equipamentos apropriados para estas avaliações. Visto isto algumas legislações têm tomado partido para estabelecer requisitos mínimos obrigatórios para a utilização de determinados equipamentos que satisfazem as necessidades indispensáveis para a sociedade [17], e por contrapartida também exige ao sector fabricante a execução de equipamentos mais eficientes para poder competir no mercado.

A energia representa sem dúvidas uma importante função na qualidade de vida da sociedade, mas também uma despesa relevante na estrutura orçamental de qualquer nação, pelo que, a importância da consciencialização e a prática para um consumo sustentável eficiente representa um fator crucial na solução de problemas ambientais e económicos.

Caraterizando o parque imobiliário português, pode-se afirmar que a maioria dos edifícios destinados à habitação construído antes de 1990, possuem uma transmissão térmica elevada devido às deficientes envolventes (Figura 7) e à falta de sistema de acondicionamento do ar, seja para aquecimento ou arrefecimento. [18] Sendo assim que, o consumo de energia final vê-se afetado pela necessidade dos usuários em manter o conforto térmico procurando a solução em aparelhos pouco eficientes e de altos consumos.



Figura 7 - Características térmicas das edificações portuguesas, adaptado de [18]

No que faz referência as edificações novas, a eficiência energética atualmente já é estudada desde a fase de projeto o que se transforma na redução de gastos e necessidades energéticas futuras. Para edifícios existentes a alteração das condições de serviço com vista à otimização permitiria diminuir os consumos, embora existam análises de custo benefício interessantes de estudar para este caso.

O crescimento da população especificamente nas grandes cidades representa um fator importante no desenvolvimento de medidas sustentáveis devido à imensa procura de energia gerada pelos centros urbanos. Em 2010 os edifícios a nível mundial foram responsáveis de consumir 32% da energia final e emitir 19% dos GEE. Segundo o relatório “Eficiência energética nos edifícios residenciais” desenvolvido pela Comissão Europeia em 2008 em Portugal, os edifícios consumiram o equivalente a 5,8 Mtep o que se transforma em quase 30% da energia primária especificamente em mais de 60% da energia elétrica, o mesmo estudo indica que a energia final em edifícios de habitação se divide da seguinte forma: para cozinha e aquecimento de águas sanitárias 50%, para acondicionamento do ar 25% e outro 25% para iluminação e eletrodomésticos, estes dados são relevantes para estudar e aplicar medidas de eficiência energética. Para estudar os consumos de energia de uma edificação também podem ser analisadas as suas etapas (Figura 8) com vista a fortalecer numeráveis deficiências que aumentam a procura energética. [19]

- Etapa de planificação e projeto: importantes para definir os tipos de materiais a utilizar e o sistema construtivo a aplicar, desenvolvimento de documentos necessários para o bom desenvolvimento da seguinte fase;
- Etapa de Construção: seguimento do todo o anteriormente planeado de forma a que existam o menos possível de percalços que comprometam a utilização de recursos, materiais e energias;
- Etapa operativa (utilização/exploração): devido à vida útil do edifício esta fase pode ser considerada a mais solicitante de recursos energéticos relativamente aos padrões de utilização;
- Fase de desconstrução ou demolição (Fim da vida útil): devem ser estudadas as possibilidades de reutilização de matérias.

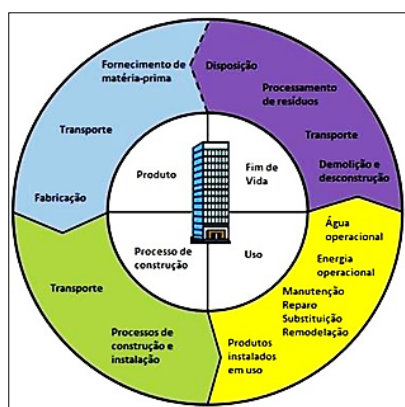


Figura 8 - Ciclo de uso de energia de um edifício [20]

Um fator económico importante é representado também pela necessidade da reabilitação energética de edifícios existentes, quase um quarto das edificações europeias foram construídas no século passado e muitas delas ultrapassando a chamada vida útil maioritariamente devido a uma componente cultural, histórica ou arquitetónica que a caracteriza, devido a isto a eficiência energética destes, atualmente, pode ser considerada como deficiente. Em edificações regulares a não reabilitação energética ou a falta de certificação energética pode também ser sinónimo de deficiências nos elementos como paredes, tetos, janelas, portas e coberturas ou a falta de aproveitamento de energias limpas que

permitam uma boa ventilação, iluminação e acondicionamento de temperaturas e águas quentes sanitárias, sendo este um problema que pode ser visto refletido no valor dos imóveis.

Segundo dados do Recenseamento da População e Habitação de 2011, em Portugal quase 2 milhões de imóveis necessitam de intervenção para a sua recuperação e possível melhoramento energético, este número representa 34% do parque edificado nacional. A carência de recuperação energética pode ser afetada pela falta de recursos dos seus proprietários, viabilidade de recuperação do imóvel consoante a vida útil do mesmo, insuficiente vantagem custo benefício da inversão em períodos curtos, falta de informação sobre impacto com o meio ambiente, desconhecimento dos efeitos da qualidade do ar interior com benefícios na saúde, etc. [20]

2.4 MEDIDAS ADOTADAS PELA EU E PORTUGAL PARA O MELHORAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A otimização ou a pouca utilização de energia para satisfazer as diferentes necessidades de uma edificação não representa um conceito novo, mas sim tem vindo a ser cada vez mais popularizado com as políticas desenvolvidas internacionalmente para controlar problemas socioeconómicos e ambientais como o aquecimento global e as crises financeiras com origem na utilização de combustíveis fósseis.

Na década de 70 foi estudado o conceito de casa passiva (Passivhaus) com o objetivo de explorar os recursos naturais do local de implantação da edificação para assim obter a menor utilização possível de energia primária provenientes de fontes que causassem gastos para os seus utilizadores, em especial energias adotadas para o aquecimento e refrigeração. A meados dessa mesma década foi construída na Dinamarca por Esbensen e Korsgaard uma casa experimental com a designação de “casa de energia zero”, também na Alemanha se executaram algumas vivendas experimentais onde se desenvolveram alguns tipos de isolamentos, entre os anos 70 e 80 nos Estados Unidos da América desenvolveram-se alguns projetos de edificações muito perto de alcançar o estabelecido no conceito de casas passivas referido por Edward Mazria no seu livro “Passive Solar Energy Book”, sendo estas edificações desprezadas pelo setor da construção estado-unidense.

Foi nos finais dos anos 80 onde este método pouco considerado foi estandardizado na Alemanha pelos professores Bo Adamson e Wolfgang Feist definindo objetivos nas procuras de energia necessárias para uma edificação. Em síntese a procura de energia anual para aquecimento ou arrefecimento não devia superar os 15 kWh/m² e para as restantes necessidades como iluminação, aquecimento de águas sanitária, utilização de eletrodomésticos, etc. não devia sobre passar os 120 kWh/m² ano. O primeiro edifício construído com esta parametrização foi em 1990 em Darmstadt Alemanha. Este tipo de projetos assegurava uma poupança de 75% de energia total e foi considerada pela Comissão Europeia como eficiente, desenvolvendo programas de aplicação principalmente em Alemanha, Áustria e países escandinavos [21]. Na atualidade a metodologia Passivhaus é uma das mais conhecidas a nível mundial por promover standards de eficiência muito elevados inclusive superior aos requisitos de algumas normativas oficiais, a norma internacional ISO 7730:2005 define vários critérios para que uma edificação possa obter a classificação Passivhaus. [22]

A nível mundial no ano 1992 foi assinado um convénio organizado pelas Nações Unidas com referência às mudanças climáticas onde o principal objetivo era estabilizar os níveis já existentes de emissões de GEE para impedir problemas antropogénicos no clima. Em 1997 os requerimentos tornaram-se mais exigentes devido ao estabelecido no protocolo de Quioto, onde, desta vez as reduções de emissões de GEE se vinculavam a países desenvolvidos pelo que os assinantes deviam comprometer-se de forma sustentável na redução das mencionadas emissões. Em 2015 no chamado acordo de Paris as responsabilidades eram globais e o objetivo era desenvolver medidas que não permitissem o aumento da temperatura terrestre superior a 2 °C. [23]

Considerando políticas europeias lançadas para os Estados membros a meados da década de 80 e inícios da década de 90 relativas às poupanças de energia e controle das emissões, estabeleceu-se uma meta de chegar ao ano 2000 com a mesma quantidade de emissões do ano 1990 [DIRECTIVA 93/76/CEE]. Alguns investigadores destacam a importância do conceito Passivhaus como incitador da criação desta normativa mais focada à edificação (setor terciário e residencial). Como objetivo destacável desta diretiva propõem-se a certificação energética dos edifícios com a finalidade de melhorar o investimento do setor imobiliário e incentivar a poupança energética. Como medidas técnicas foram implementadas a utilização de isolamentos térmicos em edifícios novos, a inspeção periódica de caldeiras e auditorias em empresas de alto consumo. A nível legislativo a Comunidade Económica Europeia não estabeleceu a obrigatoriedade a estas recomendações.

Conforme o Protocolo de Quioto celebrado em 1997 pelas Nações Unidas com enfoque nas mudanças climáticas a EU adotou um compromisso mais rigoroso ao estabelecido, este indicava a redução de pelo menos 5% das emissões de GEE no período 2008-2012, mas a Europa comprometeu-se a ter uma redução do 8%. Entre outras sugestões este protocolo promove a eficiência energética em todos os setores da economia incluindo a edificação.

Referente a promover a eficiência energética dos edifícios e seguindo as sugestões do Protocolo de Quioto a EU desenvolve a Diretiva 2002/91/CE onde se considerou que para lograr dita eficiência era necessário analisar: a relação custo benefício, as condições climáticas e as condições do ambiente interior. Nesta diretiva foram incluídos requisitos mínimos de eficiência energética e a sua certificação, não só para edifícios novos, mas também para edifícios sujeitos a grandes intervenções com área igual ou superior a 1000 m². Todos os edifícios pertencentes à administração pública com mais de 1000 m² deviam exibir o certificado energético e por último todas as certificações tinham uma validade de dez anos. [24]

Para limitar as emissões de CO₂ mediante a eficiência energética o Parlamento Europeu criou a Diretiva 2006/32/CE fomentando que o setor da energia desenvolvesse programas de poupança destinados ao consumidor final com o objetivo de reduzir o consumo em 9% até o ano 2016, e os estados membros também estariam obrigados a desenvolver planos de ação para o melhoramento da eficiência energética com as medidas dispostas a cumprir e a ser entregues nos anos 2007, 2011 e 2014 incluindo os progressos obtidos em cada plano anterior.

Para fomentar o investimento nas energias renováveis a Comissão Europeia desenvolveu a Diretiva 2009/28/CE onde a meta centrava-se em que os edifícios da administração pública deviam implementar estes sistemas de geração de energia local com obrigatoriedade após 2011, para edifícios novos e governamentais, e após 2014 para qualquer tipo de edificação nova ou para grandes intervenções. Os equipamentos deviam apresentar a etiqueta de eficiência ou etiqueta ecológica e qualquer membro da EU apenas poderia utilizar equipamentos certificados EU.

Em 2010 elaborou-se um plano para desenvolver a economia europeia nomeado de Estratégia Europa 2020 com a visão de melhorar uma anterior estratégia que para alguns peritos foi fracassada, foram propostos muitos objetivos para os diferentes motores da economia sendo que para o tema das alterações climáticas os mais relevantes foram: a redução de 20% das emissões de GEE comparados com o ano 1990, 20% da energia deviam ser obtidas de fontes renováveis e a eficiência energética devia aumentar também em 20%, chamando assim a estes objetivo de “Meta 20-20-20”. [25]

Seguindo a meta mencionada para cumprir até 2020 a EU cria a Diretiva 2010/31/EU que revoga a Diretiva 2002/91/CE e onde determinou que um dos setores com maior potencial a investir para alcançar a poupança energética seria a edificação, estabelecendo o conceito de “*nearly-zero energy building*” (nZEB) “edifício de consumo quase nulo de energia” e como alcançar este nível de eficiência sendo as energias renováveis responsáveis de satisfazer grande parte da procura. Esta diretiva incita aos estados-membros a definir um indicador da energia primária máxima anual que deve ser consumida evitando assim ultrapassar a mesma e por contrapartida projetar edifícios de forma que consumam a energia dentro dos limites. Também estabelece uma data para que edifícios novos e governamentais sejam de consumo quase nulo de energia e que os estados devem estar comprometidos com a elaboração de planos para lograr essa obrigatoriedade. Dito isto, as principais medidas a adotar em edifícios novos ou em grandes intervenções eram desenvolver o isolamento da envolvente de forma a garantir níveis térmicos do ambiente interior ótimos e rentáveis, a nível de instalações e equipamentos técnicos, como por exemplo, as bombas de calor deviam apresentar características de eficiência estabelecidas.

Apesar dos avanços alcançados, a Comissão Europeia viu-se na necessidade de atualizar os seus objetivos enquanto ao consumo de energia primária propostos na Diretiva 2006/32/CE, pelo que desenvolve a Diretiva 2012/27/EU com indicações que permitiriam alcançar a redução de 20% da utilização de energias primárias até 2020. Os estados devem tratar de efetuar anualmente melhorias no parque edificado público de pelo menos 3% da eficiência energética e incentivar a intervenção de edifícios habitacionais e de serviço que garantam como mínimo 1,5% de poupança de energia.

Em 2014 a Convenção das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas, realizada em Lima, requereu por parte de todas as 193 nações aderentes, um plano onde se especifica todas as contribuições em matéria de emissões de GEE para serem avaliadas em 2015 no acordo de Paris e para substituir as medidas adotadas no acordo de Quioto II, a principal mudança foi de não deixar ultrapassar o aquecimento global em mais de 1.5 °C sendo a anterior meta de 2 °C valores com relação a época pré-industrial. [26]

Para alterar as anteriores diretivas que faziam referência ao desempenho energético de edifícios e para atender o acordo de Paris de 2015, onde foi definido que 50% da energia consumida na EU tinha como destino o arrefecimento e o aquecimento e que para 2050 as emissões de GEE deviam ser nulas, o Parlamento Europeu define a Diretiva 2018/844/EU com o objetivo de estabelecer as medidas de descarbonização do parque imobiliário em 36% em relação a 1990 até a data de 2050, e o desenvolvimento de um sistema energético sustentável até 2030 que permita reduzir 40% das emissões de GEE. Esta diretiva ambiciona que se efetuem intervenções profundas nos edifícios existentes para enquadrá-los também no conceito de necessidades quase nulas de energia e entre outras medidas intensas para alcançar tão ambiciosos, mas necessários objetivos.

Em resumo, a EU vem implementando medidas para o desenvolvimento da eficiência energética com a visão de mitigar as mudanças climáticas, isto através da elaboração de políticas que surgiram desde os anos 70, embora que o enfoque nas edificações foi iniciado dez anos depois. Entre as medidas de destaque pode-se mencionar: requisitos de construção devidamente normalizados e adaptados às condições de cada estado-membro, requisitos de eficiência em sistemas alimentados por energia, maior liberdade para o investimento em projetos que promovam a eficiência energética e como evidente os correspondentes apoios económicos. Algumas das exigências da diretiva “*Energy Performance of Buildings Directive*” (EPBD) transposta pelos diferentes estados membros (Figura 9) são, por exemplo, no que refere aos valores de U das envolventes dos edifícios, metodologias de otimização de custos na construção, níveis de energia mínimos para o projeto de novas edificações, etc. [27]



Figura 9 - Evolução da legislação portuguesa consoante a Diretiva (EPBD) [28]

Atendendo aos principais fundamentos internacionais e europeus, Portugal em conselho de ministros no ano 2013 para cumprir as metas denominadas “20-20-20” transpõe as estratégias desenvolvendo os seus próprios planos de atuação que procuram dar solução: à emissão de GEE; à utilização de energias renováveis e ao melhoramento da eficiência energética. É importante mencionar que o compromisso na redução de consumo de energia primária em Portugal adota como meta 25%. Alguns dos planos desenvolvidos são:

- PROGRAMA NACIONAL PARA AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS (PNAC): pretende assegurar que a redução de GEE se mantenha dentro dos limites de 18% a 23% até 2020 e de 30% a 40% menos para o ano 2030, todas estas com relação ao ano 2005. [29]
- PLANO NACIONAL PARA AS ENERGIAS RENOVÁVEIS (PNAER): pretendia alcançar a meta imposta durante o período (2010-2020) de que 31% da energia final de consumo tivesse como origem as fontes renováveis. [25]
- PLANO NACIONAL DE ACÇÃO PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (PNAEE) e PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA (ECO.AP): ambos com a visão de definir estratégias para o melhoramento da eficiência energética, sendo que no primeiro, o principal objetivo é reduzir o consumo de energia primária em 25% no geral e em 30% na administração pública até 2020 (meta superior à europeia), estabelecendo medidas como: penalização na utilização de equipamentos ineficientes, requisitos para determinar o desempenho energético, obrigatoriedade da etiqueta energética, elaboração de auditorias e apoios financeiros para programas que propõe a eficiência energética. No segundo, para alcançar a redução de 30% no consumo da energia primária, devem ser analisadas as medidas de modo a não aumentar os gastos destinados à despesa pública. Cabe mencionar que aqui se indica o conceito de edifícios com necessidades quase nulas de energia para edifícios novos a partir de 2021, mas para edifícios da administração pública desde 2019. [29, 30]
- PLANO NACIONAL INTEGRADO ENERGIA CLIMA (PNEC): é o plano desenvolvido em Portugal para dar seguimento às prescrições dos Regulamentos (EU) do período 1999-2018 do Parlamento Europeu, com o objetivo de estabelecer metas (Tabela 1) para a melhoria na Governança da União da Energia e da Ação Climática no período 2021-2030, onde as emissões de GEE devem reduzir entre 45% a 55%, a eficiência energética deve melhorar em 35% e 47% da produção de energias deve ter origem nos recursos renováveis [31].

Tabela 1 - Metas nacionais de Portugal para o horizonte 2030, adaptado de [31]

EMISSÕES (sem LULUCF, em relação a 2005)	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	RENOVÁVEIS	RENOVÁVEIS NOS TRANSPORTES	INTERLIGAÇÕES ELÉTRICAS
-45% a -55%	35%	47%	20%	15%

- ESTRATÉGIA NACIONAL PARA O HIDROGÉNIO (EN-H2): mais recentemente (2020) e aprovado pelo Conselho de Ministros, Portugal desenvolve este plano com objetivo de melhorar a economia e alcançar as metas de 2030, e estima-se que este elemento pode vir a substituir a energia produzida pelo gás natural diminuindo as importações deste último até 740 milhões de euros. No aspeto social este investimento pode gerar até 12000 postos de emprego. A produção do chamado hidrogénio verde pretende substituir os combustíveis de origem fóssil para melhorar o processo de descarbonização nos setores da economia onde não é viável a energia elétrica, de momento são mencionados o setor dos transportes pesados, a indústria nacional em produção de cimento, vidro, cerâmica, etc. [32].

2.5 CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA DOS EDIFÍCIOS

Antes de desenvolver este ponto cabe mencionar que a União Europeia criou em 2002 uma diretiva com a finalidade de garantir o compromisso dos países membros no que refere às melhoras na eficiência e consumo das energias, no desenvolvimento das energias renováveis e no controle das emissões de GEE, tudo isto referente às edificações. A diretiva EPBD tinha como principal objetivo exigir aos estados-membros a certificação energética dos edifícios seguindo uma série de indicações como:

- Indicadores de eficiência energética;
- Sistemas utilizados para a iluminação, acondicionamento do ar, ventilação e aquecimento de águas sanitárias;
- Compatibilidade do clima em relação aos sistemas utilizados;
- Tipo de avaliação aplicada.

É importante mencionar que a diretiva não indica metodologias de como devem ser feitas as certificações, pelo que cada estado-membro vê-se na liberdade de adaptar as indicações anteriormente mencionadas em normativas próprias consoante as condições energéticas e climáticas dos referidos. Por este motivo cada estado tem a flexibilidade de definir uma metodologia de cálculo.

Para avaliar a eficiência energética de uma edificação é necessário ter noção do seguinte:

- Indicadores de eficiência energética: para conhecer a eficiência energética, em primeiro lugar, deve ser determinada ou medida a quantidade de energia de consumo necessária para satisfazer as necessidades anuais da edificação em estudo considerando sempre as condições de utilização ou funcionamento e as condições climáticas do local. Basicamente existem dois tipos de indicadores energéticos, os globais ou principais que determinam o consumo anual de energia primária do edifício e podem ser expressos em (KWh/m² ano) ou por emissão de GEE onde o carbono é o mais usado e pode-se expressar da seguinte forma (kg CO₂/m² ano). O outro tipo de indicador são os parciais, maioritariamente utilizados para determinar a eficiência energética (relação consumo de energia primária e emissões que provoca) de um único sistema independente como por exemplo o sistema utilizado para preparação de águas quentes sanitárias. O indicador global ou principal depende diretamente da metodologia usada por cada país, podendo esta fazer referência ao uso de um dos indicadores ou inclusive aos dois tipos. Dependendo do grau de complexidade técnica de cada tipo de certificação adotado por um estado, podem ser apresentados outros tipos de indicadores como por exemplo a quantidade de energia primária consumida anualmente derivada de fontes renováveis ou por fontes de origem fóssil, podendo ser expressa em percentagem ou em (KWh/m² ano) e também pode ser separada por tipo de sistema como por exemplo a quantidade de energia primária utilizada pelo sistema de aquecimento, etc. A quantidade de energia necessária para satisfazer as necessidades de uma edificação pode ser determinada por dois tipos de metodologias, de forma teórica ou por levantamento de informação na edificação, a primeira consiste na estimativa das condições de utilização do edifício em estudo para poder assim determinar um sistema de

iluminação, acondicionamento do ar, ventilação e AQS. Atualmente existem softwares destinados a analisar a quantidade de energia necessária de consumo para o edifício tomando como base numerosos parâmetros como o tipo de clima do local, o tipo de isolamento do edifício, os sistemas adotados, a orientação da edificação, a geometria e dimensões da edificação, a funcionalidade do edifício, etc. É importante referenciar que os softwares utilizados para estes cálculos devem estar validados pela Agência Internacional de Energia. A segunda forma de cálculo de energia anual requerida é maiormente aplicada a edifícios existentes onde se obtém dados reais do funcionamento da edificação, podem-se avaliar a eficiência dos sistemas já aplicados, a qualidade da construção e os seus isolamentos, clima do local, etc. Neste caso não é necessário a simulação de nenhuma das variáveis ou constantes. É relevante mencionar que, embora no segundo método a informação tem um grau de confiabilidade maior, o primeiro método permite em fase de projeto através de simulações o reajuste de fatores que podem traduzir-se em poupanças energéticas significativas, isto abre caminho ao seguinte conceito. [3]

- Pontos de Comparação: após a determinação do parâmetro anterior é importante a definição de valores que permitam a prosseguimento da avaliação energética, mediante referências apropriadas para a comparação, como por exemplo, equiparar o consumo de energia do edifício definido, mas agora com variações de funcionalidade ou ocupação, ou noutra caso comparar uma edificação existente, antes e depois de uma intervenção de melhoramento de condições energéticas, e ambos casos podem ser classificados como referência interna. Quando se fala de referência externa, as comparações são feitas com o parque de edifícios de condições similares a partir de metodologias estatísticas ou referenciais qualificando assim o edifício em estudo segundo a percentagem de edifícios similares com consumo superior ou inferior ao próprio ou através da avaliação com valores de referência permitidos de consumo. [3]
- Classificação final: refere-se as características da edificação qualitativas de eficiência energética sintetizadas a um valor quantitativo com referência a uma escala adotada pelas normativas desenvolvidas por cada um dos estados e que usualmente se pode apreciar numa etiqueta colorida de fácil interpretação.

O Comité Europeu de Normalização (CEN) com base no que foi a Diretiva 2010/31/EU tem realizado esforços importantes para a concordância do conjunto de normas europeias desenvolvidas pelos diferentes estados-membros. A intenção é que possa ser alcançada uma unificação de metodologias que permitirá no futuro a objetividade, transparência e acessibilidade no desenvolvimento energético e certificações das edificações no espaço europeu. Um dos esforços mais significativos evidenciou-se após o acordo de Viena onde se desenvolveu a cooperação entre o CEN e a Organização Internacional de Normalização (ISO) com o objetivo de aproximar-se mais à unificação de critérios para a normalização no que refere ao: desempenho energético dos edifícios, certificação energética de edifícios e auditoria de instalações de sistemas utilizados para o conforto do ambiente interior edificado. Devido a isto a necessidade de cada estado desenvolver a sua própria legislação devido a diferentes parâmetros sociais, económicos, construtivos, arquitetónicos e climáticos, o Comité Europeu indica que estas normas devem

adotar a mesma estrutura no já proposto em normativas como a EN ISO 13790 - Desempenho energético de edifícios - Cálculo do uso de energia para aquecimento e refrigeração de ambientes, EN 15603 - Eficiência Energética dos Edifícios, EN 15217 - Desempenho energético dos edifícios - Métodos para expressar o desempenho energético e para a certificação energética dos edifícios. É essencial referir a existência de um documento técnico que especifica as similitudes das normas europeias com os parâmetros incluídos pela diretiva europeia “*Energy Performance of Buildings Directive*” EPBD chamado de ISO/TR 52000-2:2017 [26]

Em Portugal a transposição mais recente da EPBD é o Sistema de Certificação Energética (SCE) aprovada no Decreto nº 118/2013, de 20 de agosto sendo esta legislação da responsabilidade do Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento e do Ministério do Ambiente e da Transição Energética. Para a emissão de Certificação Energética de Edifícios o órgão responsável é a Agência para a Energia (ADENE) sendo que em matéria de eficiência energética esta agência se encontra em supervisão pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) e em matéria de qualidade do meio ambiente está debaixo do controlo da Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Para os edifícios de habitação a regulamentação utilizada que estabelece os requisitos mínimos para o desenvolvimento energético e as diferentes metodologias de cálculo é o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios Habitação (REH).

Para determinar a classe energética de um edifício de habitação é necessário determinar o rácio (RNt) entre as necessidades nominais de energia primária real (Ntc) e de referência (Nt). É importante mencionar que para este tipo de edificações os indicadores de desempenho energéticos a ser analisados são os referentes ao aquecimento, arrefecimento, ventilação (caso esta seja mecânica), produção de águas quentes sanitárias e sistemas alimentados por energias renováveis. Os indicadores associados aos sistemas de iluminação são obrigatórios (em Portugal) de análise na regulamentação indicada para a certificação de edifícios destinados a serviços.

Antes de conhecer as necessidades nominais de energia primária, devem ser calculadas as necessidades nominais anuais de energia útil seguindo a metodologia indicada pela norma europeia EN ISO 13790 transpostas em Portugal pelo Despacho 15793-I/2013 e Despacho 15793-K/2013. Para edifícios de habitação devem ser determinadas as seguintes necessidades energéticas:

- Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento: onde são analisados e calculados os fatores de transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento através da envolvente dos edifícios [kWh], transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento [kWh] e os ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento resultantes dos ganhos solares através dos vãos envidraçados, da iluminação, dos equipamentos e dos ocupantes [kWh];
- Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento: devem ser determinados os ganhos térmicos associados a fontes internas de calor e ganhos térmicos associados à radiação solar incidente na envolvente exterior opaca e envidraçada como as transferências de calor por renovação do ar e por transmissão.

- Sistemas como os de ventilação mecânica e produção de águas quentes sanitárias com ou sem apoio de energias renováveis também devem ser calculados para determinar a energia útil necessária para o devido funcionamento.

Os indicadores anteriormente referidos são os responsáveis por determinar a eficiência energética do edifício sendo classificados numa etiqueta energética (Figura 10) com uma escala (Tabela 2) que vai desde o mais eficiente (A+) até ao menos eficiente (F). A Portaria n.º 42/2019 e a Portaria n.º 98/2019 indicam que a partir de 2019 os edifícios pertencentes à administração pública devem estar enquadrados no conceito de Edifícios de Necessidades quase Nulas de Energia nZEB, e de igual forma para os restantes edifícios de carácter privados a partir de 2021, o que corresponde a que estes devem obter uma classe energética de (A+) ou (A), classificação que atualmente já é obrigatória para todos os novos empreendimentos. Enquanto aos valores de referência atuais da legislação em vigor de consumo de energia primária para edifícios novos devem ter valores de referência à classificação (B-) e de (C) para edifícios sujeitos a grandes intervenções.

Tabela 2 - Definição da classe energética de acordo com o rácio R_{Nt} , adaptado de [33]

Classe Energética	Valor de R_{Nt}
A +	$R_{Nt} \leq 0,25$
A	$0,26 < R_{Nt} \leq 0,50$
B	$0,51 < R_{Nt} \leq 0,75$
B -	$0,76 < R_{Nt} \leq 1,00$
C	$1,01 < R_{Nt} \leq 1,50$
D	$1,51 < R_{Nt} \leq 2,00$
E	$2,01 < R_{Nt} \leq 2,50$
F	$R_{Nt} \geq 2,51$

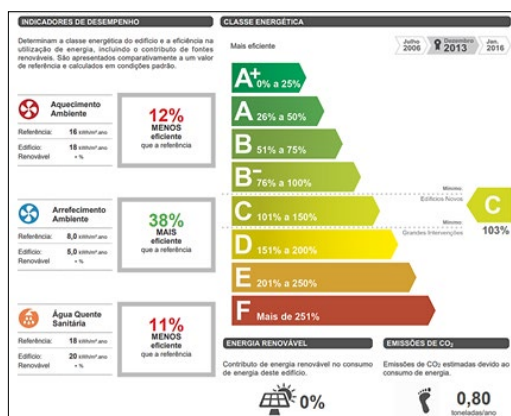


Figura 10 - Análise de indicadores energéticos e classificação final, adaptado de [34]

2.6 PROGRESSOS OBTIDOS

Segundo a Comissão Europeia no relatório “Preparar o terreno para elevar o nível de ambição a longo prazo”, relatório sobre a ação climática da UE de 2019, informou sobre a diminuição de emissões de GEE para 2018 em -23% em relação ao ano 1990 e uma redução de -2% em relação a 2017. Ditos valores já representavam o cumprimento dos objetivos fixados para o ano 2020 onde a intenção era de alcançar uma redução das emissões de GEE em -20% para a data mencionada. O valor de 2018 representou o nível mais reduzido de emissões desde 1990 e ainda registando um aumento importante

na economia europeia. Quase 1% da redução de GEE em comparação com 2017 foram provenientes dos setores do transporte, edifícios, agricultura e resíduos. [35]

Na Europa foi registada para 2016 uma redução no consumo de energia devido à incursão positiva no desenvolvimento das energias renováveis gerando numerosos benefícios que vão desde: o âmbito económico, social e ambiental materializados em desenvolvimento de novas indústrias e tecnologias permitindo a redução de custos e criação de novos postos de emprego. Para 2018, segundo a Comissão Europeia, as energias renováveis são responsáveis por suportar 17% da energia final de consumo, embora que não tão positivo devido ao crescimento da procura dessa energia que se tem registado desde 2014, colocando numa situação sensível as metas relativas à eficiência energética. Pelo que, peritos da Agência Europeia do Ambiente indicam que os progressos desenvolvidos não são suficientes para alcançar todas as metas estabelecidas para 2030. [36]

Segundo dados da Eurostat (Figura 11) para fevereiro de 2020 o consumo de energias primárias na EU não alcançava os objetivos estipulados para o ano em curso por quase 5% de diferença, mas este valor ainda pode mudar para finais do ano devido à situação atual (Pandemia Covid-19). Para o Tribunal de Contas Europeu, no seu relatório especial 2020 os edifícios ainda são o maior consumidor de energia final da EU sendo o acondicionamento do ar e o aquecimento de água responsável de 79% do consumo. Pelo que a EU indica que devem seguir as reabilitações de edifícios a nível de isolamentos e sistemas de aquecimento e iluminação mais eficientes, atualmente a EU enfoca-se na eficiência energética tanto que já estima que para alcançar os objetivos para 2030 o investimento será superior a 280 mil milhões de euros por ano em maior parte para renovar o parque edificado e para fazer mudanças nas etiquetas energéticas de aparelhos. [37]

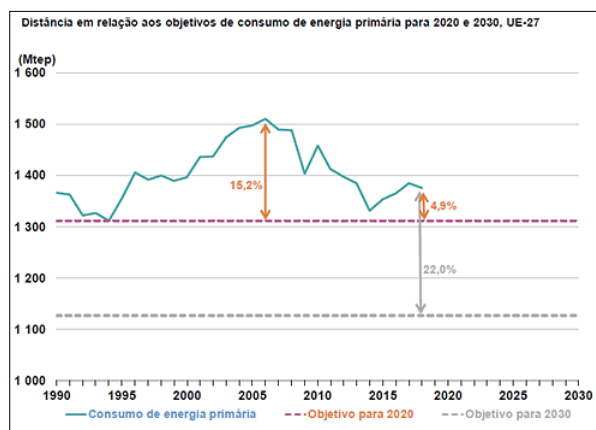


Figura 11 - Consumo de Energia Primária [37]

Atualmente o mundo é atingido por uma pandemia que tem um impacto significativo, não só para a saúde humana, mas também a nível social e económico. É uma situação crítica a nível da saúde, mas que tem manifestado efeitos positivos a nível ambiental mais especificamente na qualidade do ar devido a muitos fatores como a paralisação industrial e restrições de viagens aéreas responsáveis por uma percentagem significativa das emissões de GEE.

Somente em março de 2020 o portal Britânico da “*Carbon Brief*” estimou que as emissões de CO₂ se reduziram em -25% na China o equivalente a 200 milhões de toneladas de CO₂ (MtCO₂). Mais recentemente com a normalização lenta de atividades a redução de emissões situa-se em -18%. É de grande importância ressaltar que -25% de emissões de CO₂ na China equivale a 1% das emissões mundiais. Mesmo isto significando um resultado positivo muitos peritos como os da Associação Nacional de Conservação da Natureza mostram preocupação em que os níveis de emissões tenham um aumento significativo e prejudicial pela necessidade da recuperação económica pelo que se pode afirmar que estes efeitos positivos sejam só temporários e até contraproducentes. [38]

A investigadora Oksana Tarasova responsável do departamento de investigação de Ambiente Atmosférico da Organização Meteorológica Mundial, indica que estas reduções não terão um impacto tão significativo nas acumulações de CO₂ na atmosfera devido a que, as quantidades de poluentes acumulados estão ali desde o período pré-industrial pelo que esta escala de redução representa um impacto pouco considerável.

No caso da Europa, a Agência Europeia do Ambiente indicou que durante o bloqueio devido à pandemia, alguns setores como o do transporte público e a utilização de veículos representou diminuições de até 60% em algumas cidades, o que é visível nas baixas concentrações de dióxido de nitrogénio (NO₂) como pode-se observar na (Figura 12). Embora o ano 2020 ainda não ter finalizado, a EU estima que a paralisação das atividades representara uma queda de 7.6% do PIB e uma redução de GEE de -10% a -15% em relação a 2019, ambos dados superiores aos verificados em 2008 durante a chamada crise financeira. No que faz referência ao setor da construção e em comparação com a crise de 2008 este setor não tem representado quedas significativas, pelo contrário, tem se registado um maior consumo de materiais destinados à reabilitação de edifícios e novos empreendimentos. O aumento de resíduos tem aumentado significativamente no que respeita à utilização de equipamentos de proteção individual e embalagens, os resíduos com decréscimo são os provenientes do sector comercial e industrial. Outro facto importante é a não recomendação do contacto e comunicação física é o uso intensivo da tecnologia o que representa uma queda no transporte. [39]

No que respeita ao Inventário Nacional de Emissões 2020, Portugal afirma que tem cumprido com os compromissos para alcançar os objetivos de 2020. As últimas medições realizadas em 2018 estimaram as emissões de GEE em cerca de 67,4 Mt CO₂-e o que representou uma diminuição de 21.3% com relação a 2005, e o sector da produção de energia e o transporte são responsáveis pelo 72% das emissões. Respeitando os objetivos da EU para 2020, Portugal se enquadra com uma redução de emissões de GEE de 21%, um melhoramento da eficiência energética em 25%. [40]

Para 2017, Portugal era mais eficiente energeticamente contabilizando que o consumo de energia final decresceu em 16 tep para gerar 1 milhão de euros de riqueza dado comparado com o ano 2007. Em grande parte, pode-se responsabilizar as energias renováveis que para a data geravam 28% da energia de consumo final. Contabilizando 1.7 milhões de certificados energéticos emitidos em Portugal se estima um potencial de poupança de 60% de energia em edifícios residenciais. [13]

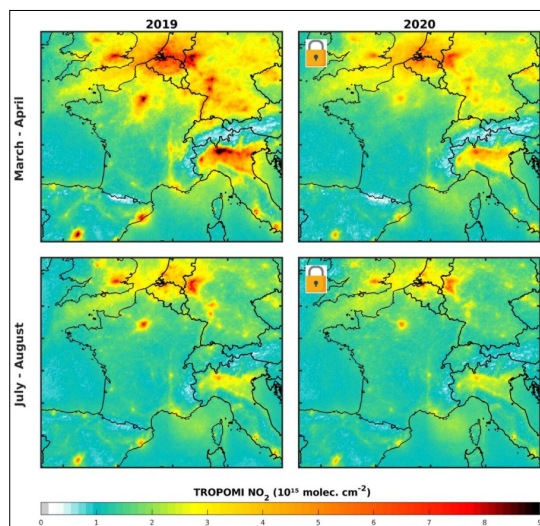


Figura 12 - Imagem do Satélite Sentinel-5P que mostra a poluição do ar na europa [41]

Um estudo de mercado em Portugal (Lisboa e Porto) desenvolvido pela ADENE em 2017, com base em 1300 entrevistas, indica que nos edifícios de habitação particular os utilizadores gastam cerca de 112 euros/mês (Figura 13) em faturas de serviços. A energia elétrica é a mais dispendiosa, onde os eletrodomésticos e a iluminação são os principais responsáveis num total de 77%.

Entre as principais preocupações das pessoas, em matéria de eficiência energética, encontra-se o fator financeiro seguido pelo ambiental e o conforto térmico associado à saúde respetivamente. A certificação energética é executada em quase 60% pela obrigatoriedade que impede a venda ou o arrendamento dos imóveis sem esta certificação.

Num universo de 111 entrevistas julgam que a certificação energética é nada ou pouco útil, com uma mesma base de entrevistas somente 29% dos consumidores levam a cabo todas ou algumas das medidas aconselhadas na certificação energética. [42]

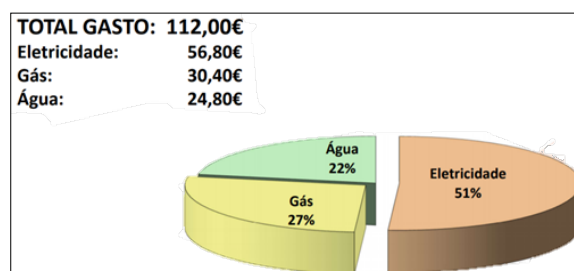


Figura 13 - Gastos mensais por serviço, adaptado de [42]

Em 2020, com o objetivo de incentivar os portugueses a certificar as suas habitações e conhecer medidas que podem reduzir custos de energia e melhorar a eficiência energética, a ADENE lançou o simulador (casA+) que através do preenchimento de algumas características simples da habitação permite aos utilizadores conhecer medidas de poupança referente aos indicadores energéticos como: o aquecimento, arrefecimento e produção de AQS. [43]

Capítulo 3

SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA EM PORTUGAL

Com base nas medidas europeias expostas no capítulo anterior, neste capítulo pretende-se apresentar a regulamentação adotada por Portugal destinada a avaliar energeticamente o parque edificado, através de uma metodologia de cálculo a qual pode ser facilitada mediante a utilização de folhas de cálculo programadas por instituições com reconhecimento.

3.1 INTRODUÇÃO

Com a finalidade de transpor as Diretivas Europeias n.º 2010/31/EU e a 2012/27/EU desenvolvidas pelo Parlamento Europeu e Conselho Europeu para o melhoramento da eficiência energética dos edifícios, em Portugal atualizou-se em 20 de agosto de 2013 o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) sustentado no diploma Decreto-Lei n.º 118/2013, onde se faz referência também aos diplomas “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação” (REH) (com análise na presente dissertação) e o “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços” (RECS). Este diploma tem sido alterado ao longo dos anos sendo a mais recente alteração (5ª) a Lei n.º 52/2018 publicada no Diário da República n.º 159/2018.

O Decreto-Lei n.º 118/2013 foi executado com a intenção de ser possível alcançar as metas (20-20-20) definidas pelo Conselho Europeu e de atualizar antigas legislações como o “Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios” (RCCTE) e o “Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios” (RSECE), sendo que a meta mais ambiciosa é alcançar através de intervenções ou novas construções o maior número possível de edifícios com necessidades quase nulas de energia.

O REH, através da aplicação ou determinação de requisitos da qualidade térmica dos edifícios e da eficiência dos seus sistemas, tem como objetivo avaliar o desempenho energético das habitações em Portugal mediante a comparação da edificação em estudo com parâmetros de referência, promovendo assim um parque edificado com elevados padrões de eficiência energética. Em resumo esta regulamentação estabelece condições mínimas para a conceção dos seguintes sistemas:

- Envolventes das edificações;
- Sistemas de climatização;
- Sistemas de preparação de águas quentes sanitárias;
- Aplicação de sistemas com aproveitamento de energias renováveis;

- Qualidade do ar do ambiente interior.

3.2 REGULAMENTAÇÃO

O horizonte desta transposição nacional, a Diretiva n.º 2010/31/EU, findou-se em março de 2020, (atualmente encontra-se em processo de atualização) já que é necessário satisfazer os objetivos estabelecidos pela diretiva mais recente (Diretiva n.º 2018/844/EU) relativos ao cumprimento de novas metas ambientais, melhoramento da qualidade de vida dos europeus e crescimento económico, ditos objetivos devem ser alcançados para os anos 2030 (curto prazo) e 2050 (longo prazo) com vista a reduzir mais as emissões de GEE com base em dados de 1990. [11, 44].

Embora o anteriormente mencionado, o Decreto-Lei n.º 118/2013 representa em Portugal o regulamento em vigor e com obrigatoriedade de aplicação para avaliar o comportamento térmico e a eficiência energética dos edifícios. Para o caso do diploma REH este deve ser aplicado a: “Edifícios Existentes” (para casos de venda ou arrendamento, salvo em caso destes processos serem efetuados entre proprietários ou locatários, frações de edifícios não constituídas como autónomas e não habitadas, e processos de expropriação com finalidade de demolição total), “Edifícios Novos” (no processo de licenciamento de construção “pré-certificado” e no licenciamento de utilização) e “Edifícios sujeitos a grandes intervenções” (não incluindo a execução de novos corpos). Para edifícios de carácter habitacional no REH são excluídos todos aqueles edifícios com superfície útil igual ou inferior a 50 m², edifícios em ruínas, edifícios com valor arquitetónico e cultural, edifícios com regulamentos de confidencialidade e controlo como estruturas militares, etc. [28, 45]

O SCE também abrange edificações ou frações destinadas a comércio e serviços no diploma RECS, mas estas não serão tratadas nesta dissertação por não fazerem parte dos objetivos. Para o REH a certificação energética deve ser emitida em edifícios unifamiliares na sua totalidade, em edificações multifamiliares por cada fração e em edificações mistas só nas frações destinadas a habitação.

A validade de uma certificação energética emitida pelo SCE tem duração de 10 anos para todos os edifícios destinados à habitação, e 6 anos naqueles edifícios em que a sua avaliação considera que devem estar sujeitos a fiscalizações periódicas (maioritariamente edifícios destinados a serviços).

Em cumprimento com indicações da Diretiva n.º 2010/31/EU, o Decreto-Lei n.º 118/2013 introduz em Portugal a aplicação do conceito de edifícios com necessidades quase nulas de energia (nZEB), promovendo que os edifícios tenham cada vez mais uma melhor eficiência energética onde a fonte de alimentação energética esteja ligada em maior parte a energias renováveis produzidas no local ou nas proximidades da edificação, resumindo este conceito como “sustentabilidade energética”. A Comissão Europeia adota este conceito como oficial, pelo que, determina que um edifício capaz de cobrir as suas necessidades de energia nulas ou pequenas deve ser considerado como um “edifício com desempenho energético muito elevado” [11]. Fazendo este conceito prático de perceber, nas edificações pretende-se reduzir significativamente o consumo médio de energia primária mediante o fortalecimento dos isolamentos térmicos das envolventes e aplicação de sistemas de apoio alimentados por energias renováveis. Para o caso neutral (ZEB) a edificação produz energia renovável suficiente para suprir a

procura anual de energia pelo que se se pode falar de um sistema em balanço. Na (Figura 14) apresenta-se as diferentes variantes deste conceito.

Um edifício, onde a capacidade de produção de energia nominal anual do local é superior à da necessidade de energia nominal anual (balanço positivo), é denominado por muitas organizações por “*Energy-Plus Buildings*”, embora não seja a terminologia oficial utilizada pela Comissão Europeia devido a que estes consideram que não existe balanço económico entre o investimento em equipamentos fotovoltaicos e microgeradores eólicos comparado com a quantidade de energia produzida. [46, 47]

No caso contrário onde as necessidades de energia são superiores à capacidade de produção (balanço negativo), os edifícios mesmo assim também podem apresentar uma eficiência energética elevada podendo estes satisfazer um ou mais tipos de uso de energia, como: o acondicionamento do ar, preparação de águas quentes sanitárias, iluminação, ventilação, etc. Este último denomina-se de nZEB.

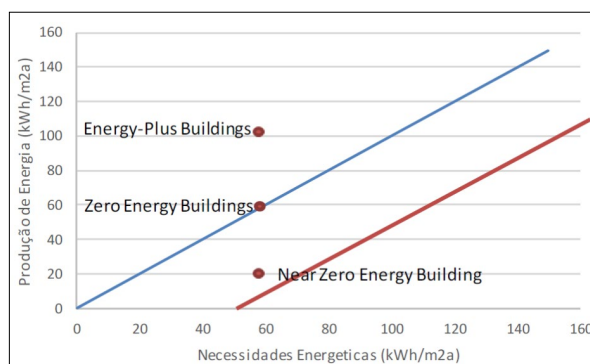


Figura 14 - Diferentes tipos de edifícios com elevada eficiência energética [46]

Esta última terminologia explicada (nZEB), é a que o Decreto-Lei n.º 118/2013 exige que seja aplicada a nível nacional em edifícios novos após 2020, e após 2018 para todos os edifícios da administração pública. Pelas condições climáticas portuguesas e a boa capacidade de irradiação solar, o principal indicador que se impõe no modelo (REH) é satisfazer através de fontes renováveis (enquanto ao uso de energias) a preparação de águas quentes sanitárias (AQS) respeitando sempre a viabilidade económica da instalação de sistemas a aplicar. Como medidas passivas (não utilização de equipamentos alimentados por energia final) a obtenção de edifícios (nZEB) deve cumprir uma série de requisitos no seu sistema de envolvente que permita reduzir os consumos energéticos por ventilação, iluminação, acondicionamento do ar, etc. [45] Este tipo de medidas com alta variabilidade face à localização climática da edificação, requer que os edifícios novos sejam estudados em fase de projeto, para fatores como:

- A orientação solar dominante;
- Fatores de forma aplicados consoante as áreas de exposição ou a elementos construtivos que possam diminuir condições de iluminação, ventilação, aquecimento, etc.;
- Exposição a ventos dominantes;
- Fatores de sombreamentos ou de obstrução de luz, vento, etc.;
- Aplicação de estratégias construtivas passivas consoante os fatores anteriores.

Embora os fatores mencionados sejam considerados, as envolventes de uma edificação devem ser estudadas para conferir a sua transmissão térmica que se pode traduzir em ganhos e perdas de calor, o que pode comprometer o conforto térmico do espaço interior e o aumento de utilização de energia para adequar o dito ambiente.

A instalação de equipamentos solares térmicos é obrigatória em edifícios novos para satisfazer a preparação de águas quentes sanitárias, sempre que as condições de irradiação solar do local seja suficiente e que os painéis não ocupem um espaço superior a 50% da área da cobertura da edificação. O sistema solar instalado também pode satisfazer outras necessidades da edificação, como: o aquecimento do ambiente interior, iluminação, etc., mas a prioridade deve ser sempre a preparação de (AQS). Também podem ser instalados outros sistemas alimentados por energias renováveis, mas estes devem assegurar uma produção de energia anual igual ou superior à dos sistemas solares.

Em resumo, todos os edifícios de habitação são abrangidos pelo regulamento (REH) com exceção daqueles excluídos pelo (SCE), sendo que as edificações devem ser avaliadas nas suas envolventes (opacas e envidraçadas), sistemas técnicos e qualidade da ventilação de modo a determinar as necessidades nominais anuais de energia útil destinadas a arrefecimento (N_{vc}) e aquecimento (N_{ic}), a eficiência energética e a qualidade dos sistemas técnicos o que permite determinar a quantidade de consumo anual em energia primária (Figura 15) indispensável para a emissão do CE. De forma sintetizada uma edificação deve cumprir os seguintes requisitos:

- Envolventes: não podem ultrapassar os valores regulamentares para manter a qualidade térmica;
- Ventilação: deve respeitar as renovações horárias regulamentares para as estações de arrefecimento e aquecimento;
- Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}): não pode ultrapassar os valores definidos na regulamentação (edifício de referência) para energia útil de aquecimento (N_i);
- Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (N_{vc}): não pode ultrapassar os valores definidos na regulamentação (edifício de referência) para energia útil de arrefecimento (N_v);
- Necessidades nominais anuais de energia primária (N_{tc}): no caso de edifícios novos esta não pode ultrapassar os valores de necessidades de energia primária (N_t) definidos na regulamentação;

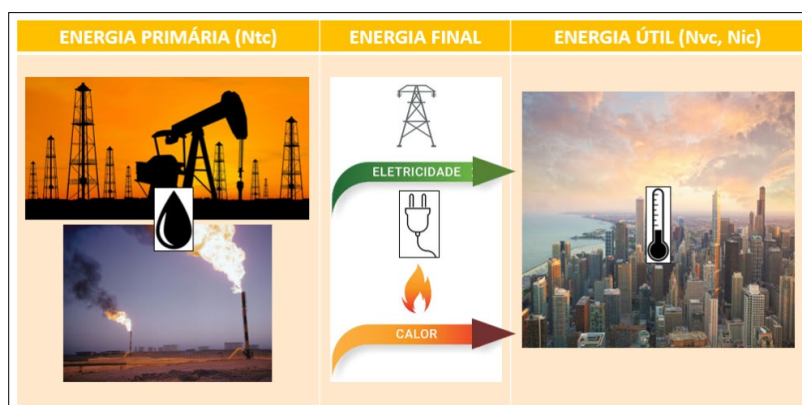


Figura 15 - Necessidades Energéticas, adaptado de apontamentos de Física das construções

- Sistemas técnicos: neste caso a obrigatoriedade para edifícios novos de habitação é a implementação de sistema solar térmico para a preparação de (AQS) que devem cumprir com o explicado anteriormente.

Embora Portugal não apresenta uma transposição a Diretiva (UE) 2018/844 no Parlamento Europeu, o Decreto-Lei n.º 118/2013 tem manifestado numerosas atualizações em todos os diplomas que complementam o SCE (Figura 16), desde 2013 se podem apreciar aperfeiçoamentos em diferentes parâmetros como: de qualidade da envolvente térmica e de eficiência energética de sistemas técnicos [28]. Os diplomas fundamentais para a aplicação do REH e para alcançar a obtenção do certificado energético do SCE são:

- Portaria n.º 349-B/2013 [48] Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), requisitos de conceção para edifícios novos e intervenções. Este diploma pode considerar-se como o mais importante porque apresenta os valores de referência para verificar parâmetros como: o procedimento de determinação da classe do desempenho energético do chamado “Edifício de Referência”, as metodologias de cálculos para determinar os valores máximos de necessidades energéticas, a qualidade térmica da envolvente, ventilação (renovação do ar), aplicação e aproveitamento de equipamentos alimentados por energias renováveis. À data, as atualizações deste diploma são a Portaria n.º 379-A/2015, Portaria n.º 319/2016, Portaria n.º 98/2019 e a Portaria n.º 297/2019.
- Despacho n.º 15793-D/2013 [49] define a conversão entre energia final e energia primária utilizada para definir o valor de necessidades nominais anuais de energia primária. Este despacho tem sido retificado pela Declaração de retificação n.º 129/2014.
- Despacho 15793-E/2013 [50] aplicada no caso de edifícios existentes onde a obtenção de informação seja impossível de verificar em qualquer dos parâmetros necessários para alcançar a certificação. Estabelece regras de simplificação no levantamento de dita informação.
- Despacho n.º 15793-F/2013 [51] define o zoneamento climático de um determinado local com o propósito de conhecer os parâmetros climáticos nas estações de aquecimento e arrefecimento. Tem uma retificação apresentada na Declaração de retificação n.º 130/2014 onde se alteram algumas zonas e alguns parâmetros climáticos.
- Despacho n.º 15793-H/2013 [52] quantifica o contributo para o aproveitamento de fontes de energia renováveis segundo o sistema técnico a aplicar. Atualizado pelos Despacho n.º 3156/2016 e o Despacho n.º 10346/2018.
- Despacho n.º 15793-I/2013 [53] estabelece a metodologia de cálculo a aplicar para a determinação das necessidades nominais anuais de energia útil de arrefecimento (N_{vc}) e aquecimento (N_{ic}) do ambiente interior, as necessidades de energia útil para a preparação de AQS e as necessidades nominais anuais globais de energia primária (N_c). É importante destacar que ditos valores pertencem ao chamado “Edifício real”. As atualizações estão apresentadas na Declaração de Retificação n.º 128/2014 e no Despacho n.º 3777/2017.

- Despacho nº 15793-J/2013 [54] define a metodologia para determinar a classe energética de uma edificação, aqui em função dos valores de necessidades nominais de energia primária (N_{te}) do “Edifício real” e de necessidades nominais de energia primária (N_t) do “Edifício de referência”.
- Despacho nº 15793-K/2013 [55] indispensável para determinar todos os parâmetros térmicos da envolvente da edificação necessários para o cálculo das necessidades energéticas. Aqui são avaliados todos os fenómenos termofísicos da edificação que serão explicados mais adiante. A única retificação deste despacho está publicada na Declaração de Retificação nº 127/2014.

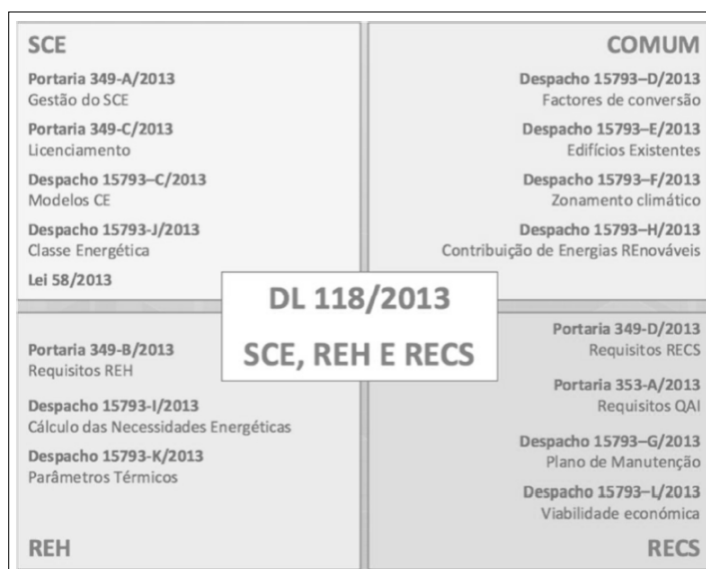


Figura 16 - Sínteses dos diplomas que completam o SCE, adaptado de [56]

O REH deve ser aplicado em diversas situações, como por exemplo: em projeto e construção de edifícios novos, reabilitação energética de edificações (envolvente da edificação ou sistemas técnicos), e na avaliação energética de uma intervenção de qualquer edifício (novo, existente ou de grande intervenção). O procedimento de aplicação de regulamentação sintetiza-se da seguinte forma:

- Para a obtenção do licenciamento (para dar início a operações de construção de edifícios novos de habitação) é importante que um técnico habilitado desenvolva o chamado “projeto de comportamento térmico”, onde são expostas as soluções construtivas adotadas que garantem valores referenciados no REH e a caracterização da edificação. Após o início das atividades o Perito Qualificado (PQ) deve constatar os elementos projetados com a regulamentação para poder solicitar a emissão de uma pré-certificação energética (PCE).
- Após a finalização da obra de construção ou da execução de uma grande intervenção é necessária uma autorização de utilização, requerida através do preenchimento de uma ficha que define as características dos elementos da edificação a qual deve seguir o modelo indicado na Portaria nº 349-C/2013. Após isto o PQ verifica mediante uma fiscalização no local a conformidade da edificação com as regulamentares. Em caso de conformidade será solicitada a emissão do certificado energético (CE) [28].

- No caso de uma edificação ou fração estar sujeita a uma verificação devido a cumprir o exigido pelo SCE enquanto a intervenções requeridas não será obrigatório a emissão de novo PCE ou CE (sempre que a intervenção seja pequena), mas o técnico responsável deve emitir uma declaração (Termo de responsabilidade) com o cumprimento de execução das exigências solicitadas.
- No caso de que o tipo de intervenção seja superior ao 25% do valor da edificação os procedimentos de licenciamento e certificação serão iguais às de um novo empreendimento.

3.3 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Para dar início a esta secção é importante mencionar que o parâmetro mais relevante do certificado energético (CE) é a classe energética, e como mencionado no capítulo anterior (Secção 2.6) a metodologia consiste em determinar o “rácio de classe energética” (R_{Nt}) que é a relação entre necessidades nominais anuais de energia primária do edifício real (N_{tc}) e as do edifício de referência (N_t), o procedimento de calculo do edifício de referencia é similar ao real com a diferença que este adota alguns valores constantes, omitem os sistemas renováveis e consideram unicamente a ventilação natural.

Esta metodologia está sustentada no diploma suplementar do (SCE) Despacho nº 15793-J/2013 estabelecendo uma tabela com uma escala de classificação (Edifícios de habitação) como foi anteriormente apresentada na Tabela 3. A equação a aplicar é:

$$R_{Nt} = \frac{N_{tc}}{N_t} \quad (1)$$

Mas antes de determinar as necessidades nominais anuais de energia primária é importante conhecer todas as parcelas e fatores de comportamento físico-térmicos que permitem o seu cálculo. De forma sintetizada as necessidades nominais anuais de energia não são mais do que o balanço das diferentes necessidades que possui uma edificação ou fração de habitação para o bom desempenho das atividades humanas essenciais, convertidas de valores de energia útil ($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$) em energia primaria ($\text{kWh}_{EP}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$) através de fatores de conversão de energia estabelecidos no Despacho nº 15793-D/2013.

As necessidades energéticas facultadas pelo (REH) para determinar a classificação energética de uma edificação destinada a habitação são as seguintes:

- Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento;
- Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento;
- Necessidades de energia útil para preparação de AQS;
- Energia elétrica necessária ao funcionamento dos sistemas de ventilação (somente nos casos com sistemas de ventilação mecânica);
- Energia produzida a partir de fontes de origem renovável (somente consideradas as energias consumidas na preparação de AQS e acondicionamento do ar interior).

O comportamento físico térmico de uma edificação ou fração de habitação durante a estação de aquecimento (inverno) ou arrefecimento (verão) é o que determina a quantidade de energia necessária para o acondicionamento dos espaços internos. Isto vê-se plasmado na metodologia apresentada no

Despacho n.º 15793-I/2013 a qual define o edifício real e todos os parâmetros térmicos que intervêm no cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}).

A relação entre o edifício real (edifício em estudo) e o edifício de referência (requisitos de referência) para as necessidades nominais anuais de energia são estabelecidas no Decreto-Lei n.º 118/2013 especificamente nos artigos 26º e 27º onde se apresenta o seguinte:

- Necessidades de aquecimento devem ser inferiores ou iguais às necessidades de aquecimento de referência ($N_{ic} \leq N_i$);
- Necessidades de arrefecimento devem ser inferiores ou iguais às necessidades de arrefecimento de referência ($N_{vc} \leq N_v$);
- Necessidades de totais devem ser inferiores ou iguais às necessidades totais de referência ($N_{tc} \leq N_t$).

Os cálculos das necessidades energéticas do edifício de referência correspondem a uma classe energética B- para edifícios novos, mas atendendo ao critério de edifícios nZEB que já é aplicável em edifícios de ocupação por entidades públicas e proximamente aplicável em todos os edifícios novos a partir de 2021 se estabelece que para que um edifício tenha esta condição de eficiência energética:

- A terceira alteração da Portaria n.º 349-B/2013 indica que o valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento N_{ic} devem ser inferiores ou iguais ao 75 % do N_i , o valor das necessidades energéticas nominais de energia primária N_{tc} deve ser inferior ou igual a 50 % do N_t e na zona climática II se a relação N_{ic}/N_i for igual ou inferior a 0,6 e o fator solar dos vãos envidraçados for inferior ou igual a 0,15 se pode considerar que N_{ic} equivale ao valor de 0 (nulo).

[57]

3.3.1 Necessidades nominais anuais de energia primária

Como indicado no início da Secção 3.3 as necessidades nominais de energia primária necessária para determinar a qualificação energética de uma fração em estudo resultam da soma de uma série de necessidades (Figura 17) mediante a aplicação da expressão geral de cálculo estabelecida no Despacho n.º 15793-I/2013 que tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 N_{tc} = & \sum_j \left(\sum_k k \frac{f_{i,k} \cdot N_{ic}}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k k \frac{f_{v,k} \cdot \delta \cdot N_{vc}}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} \\
 & + \sum_j \left(\sum_k k \frac{f_{a,k} \cdot Q_a / A_p}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \frac{W_{vm,j}}{A_p} \cdot F_{pu,j} \\
 & - \sum_j \frac{E_{ren,p}}{A_p} \cdot F_{pu,p}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Onde:

f_k – Representa a parcela das necessidades de energia útil para os diferentes tipos de necessidades.

η_k – Representa a eficiência do sistema.

F_{pu} – Representa os fatores de conversão a energia primária habilitados no Despacho n.º 15793-D/2013 segundo o tipo de fonte de energia.

δ – Representa um fator de risco de sobreaquecimento na estação de arrefecimento.

*Os restantes parâmetros são definidos à frente.

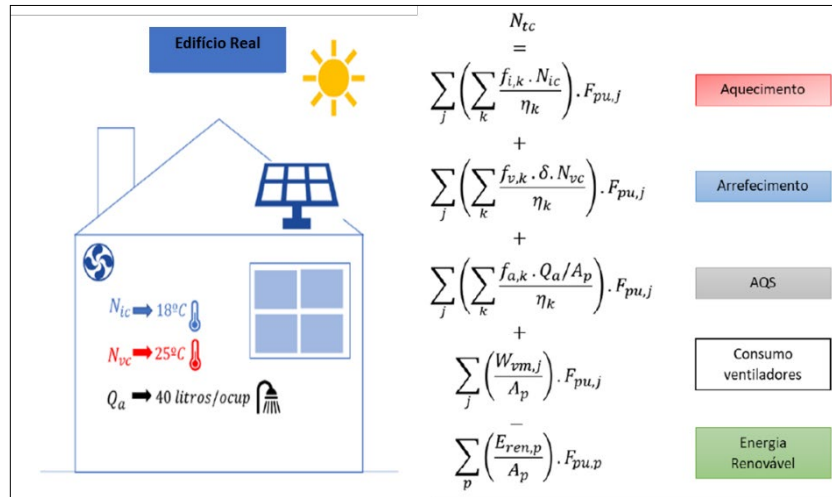


Figura 17 - Esquema do desempenho energético do edifício real, adaptado de [58]

Para a determinação das necessidades nominais anuais de energia primária de referência (N_t) também se deve somar todas as parcelas de referência com exceção das parcelas de ventilação, onde é sempre assumida ventilação natural e da parcela de energias renováveis, pelo que esta necessidade é calculada recorrendo à seguinte expressão indicada pela Portaria n.º 349-B/2013.

$$N_t = \sum_j \left(\sum_k k \frac{f_{i,k} \cdot N_i}{\eta_{ref,k}} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k k \frac{f_{v,k} \cdot N_v}{\eta_{ref,k}} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k k \frac{f_{a,k} \cdot Q_a / A_p}{\eta_{ref,k}} \right) \cdot F_{pu,j} \quad (3)$$

3.3.2 Comportamento da habitação durante a estação de aquecimento

O ambiente interior necessita durante o inverno uma quantidade de energia térmica para manter as condições de conforto dos seus ocupantes, o balanço para manter esta condição depende da diferença entre a quantificação de energia que é transferida ao exterior (perdas térmicas) e a que é transmitida ao interior (ganhos térmicos). Na expressão de quantificação de necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) que se apresenta abaixo, podem observar-se os parâmetros térmicos que afetam o seu resultado que deve ser expresso em kWh/(m².ano).

$$N_{ic} = (Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i}) / A_p \quad (4)$$

Onde:

$Q_{tr,i}$ – Representa a transferência ou perda de calor por transmissão térmica através da envolvente do edifício na época de aquecimento. A unidade destinada para este parâmetro é kWh;

$Q_{ve,i}$ – Representa a transferência ou perda de calor por ventilação na estação de aquecimento. Deve ser expressa em kWh;

$Q_{gu,i}$ – Representa os ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento. Representado em kWh;

A_p – Representa a dimensão de área útil de pavimento do edifício à qual deve ser medida pelo interior e expressa em m².

Em síntese pode-se afirmar que o comportamento térmico durante a estação de aquecimento deve estar em balanço (Figura 18) com a referência de que se deve manter uma temperatura do espaço interior regulamentar de 18 °C durante toda a etapa de inverno. [58]

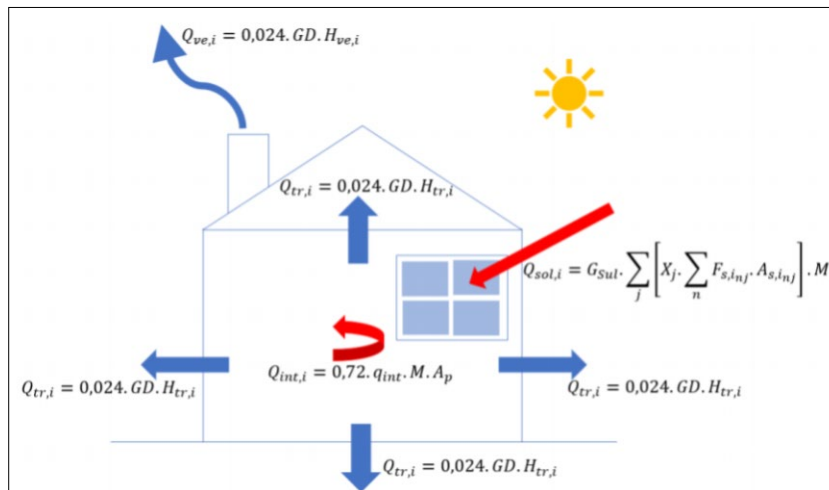


Figura 18 - Esquema do balanço energético na estação de aquecimento [58]

3.3.2.1 Transferência de calor por transmissão ($Q_{tr,i}$)

Partindo do princípio de que na estação de aquecimento a temperatura média do ar exterior (T_e) é inferior à temperatura média do ar interior (T_i), nas edificações se manifesta o fenómeno de difusão térmica onde ocorrem perdas de calor de um corpo mais quente com direção a um corpo mais frio em qualquer forma de contacto. Devido ao fenómeno mencionado o espaço interior pode perder toda a sua energia térmica até igualar a T_e , o que proporcionaria o desconforto térmico nos seus ocupantes e como consequência estes devem acudir aos equipamentos de aquecimento o que pode aumentar o consumo anual de energia.

O Despacho nº 15793-I/2013 indica a seguinte expressão para determinar este tipo de perdas de calor kWh.

$$Q_{tr,i} = 0,024.GD.H_{tr,i} \quad (5)$$

Onde:

GD – Representa o número de graus-dias da estação de aquecimento. A unidade é ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$).

$H_{tr,i}$ – Representa o coeficiente global de transferência de calor por transmissão de toda a envolvente em contacto com o exterior. O coeficiente $H_{tr,i}$ deve ser expresso em $\text{W}/^{\circ}\text{C}$.

Na Figura 19 apresenta-se um esquema de perda de calor de uma habitação.

Todos os coeficientes de transferência de calor por transmissão dependem do coeficiente de transmissão térmica (U) expressado em $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, o qual quantifica os fenómenos físico-térmicos de convecção, radiação e condução dos elementos opacos e vãos envidraçados através da resistência térmica dos mesmos o que depende das variações de temperatura que solicitam as superfícies tanto do lado interior como exterior. Os coeficientes de transmissão térmica dos elementos não devem possuir valores superiores aos máximos admissíveis propostos pela Portaria nº 349-B/2013 atualizados na Portaria nº 379-A/2015 nas Tabelas I.05A e I.05B. As expressões de cálculo de este coeficiente variam segundo o tipo de contacto que possa ter o elemento (ar, solo ou outras edificações).

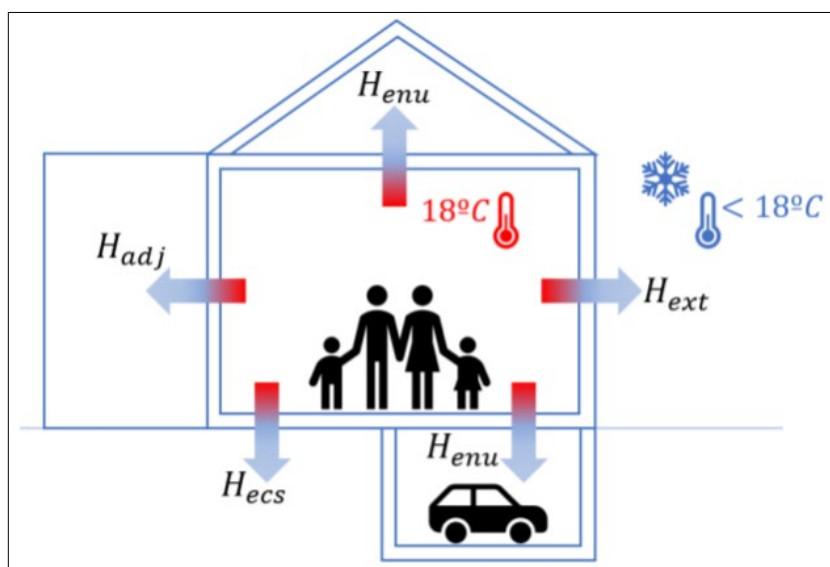


Figura 19 - Esquema de coeficientes de determinação de perdas pela envolvente [58]

3.3.2.2 Transferência de calor por ventilação ($Q_{ve,i}$)

Todo o espaço interior habitável necessita de renovações de ar para manter condições de conforto, higiene e salubridade pelo que a única forma de alcançar estas condições é através da ventilação, podendo esta ser natural ou mecânica. Mas de igual forma o ar representa um meio de troca de temperatura o que consegue arrefecer a T_i provocando incremento na utilização de energia para fins de aquecimento. O caudal de ar de uma habitação deve ser também estudado em fase de projeto. A Portaria nº 349-B/2013 estabelece que a taxa nominal de renovação do ar interior (R_{ph}) não deve ser inferior a $0,4 \text{ h}^{-1}$ na estação de aquecimento o que equivale a que por cada hora deve ser renovado 40% da massa de ar interior total. As perdas de calor produzidas pelas trocas de ar devem ser calculadas com a seguinte expressão:

$$Q_{ve,i} = 0,024 \cdot GD \cdot H_{ve,i} \quad (6)$$

Onde:

$H_{ve,i}$ – Representa o coeficiente global de perda de calor por ventilação e deve ser determinado com a expressão indicada no Despacho nº 15793-K/2013. Este coeficiente deve ser expresso em ($\text{W}/^\circ\text{C}$).

3.3.2.3 Ganhos térmicos úteis ($Q_{gu,i}$)

Embora na estação de aquecimento as edificações são capazes de registar ganhos de energia térmica inclusive por todos os meios de transferência antes mencionados, sendo que a regulamentação só considera como ganhos úteis todos aqueles adquiridos pelos vãos envidraçados (radiação solar) e por fontes internas (dissipação de calor dos equipamentos domésticos com exceção dos sistemas de aquecimento e as atividades metabólicas dos ocupantes).

Para calcular este ganho o Despacho nº 15793-I/2013 indica a aplicação da seguinte expressão:

$$Q_{gu,i} = \eta_i \cdot Q_{g,i} \quad (7)$$

Onde:

η_i – Representa o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento.

$Q_{g,i}$ – Representa os ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento que são dados pela soma dos ganhos térmicos associados a fontes internas de calor ($Q_{int,i}$) e dos ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos vãos envidraçados ($Q_{sol,i}$). Os ganhos térmicos devem ser apresentados em (kWh).

3.3.2.4 Necessidades nominais de energia útil para aquecimento de referência (N_i)

O edifício real em estudo regulamentarmente deve ser comparado com os valores de referência de todos os parâmetros anteriormente determinados, isto estabelecido na Portaria n° 349-B/2013 com a finalidade de garantir que os requisitos de qualidade térmica das envolventes e a eficiência de sistemas aplicados sejam adequados.

É importante ressaltar que na atualização da Portaria n° 349-B/2013 (Portaria n.º 319/2016) deve-se admitir um valor mínimo de necessidades nominais de energia útil para aquecimento de referência equivalente a 5 kWh/(m².ano) ou superior.

O valor das necessidades nominais de energia útil para aquecimento de referência (N_i) deve ser determinado através da seguinte expressão:

$$N_i = (Q_{tr,i ref} + Q_{ve,i ref} - Q_{gu,i ref})/A_p \quad (8)$$

Onde:

$Q_{tr,i ref}$ – Refere-se à transferência de calor por transmissão através da envolvente de referência na estação de aquecimento.

$Q_{ve,i ref}$ – Refere-se à transferência de calor por renovação do ar de referência.

$Q_{gu,i ref}$ – Refere-se aos ganhos de calor úteis de referência.

$$Q_{gu,i ref} = 0,6 * (0,72 * 4 * M * A_p + G_{sul} * 0,146 * 0,15 * A_p * M) \quad (9)$$

3.3.3 Comportamento da habitação durante a estação de arrefecimento

Durante a estação de arrefecimento (verão) atendendo à segunda lei da termodinâmica que indica que a direção de transmissão de calor é sempre do corpo mais quente ao mais frio, e partindo da hipótese mais comum de considerar que durante a etapa de verão a T_e é superior à T_i pode-se dizer que esforços energéticos do ambiente interior veem-se focados em acondicionar o ar para o arrefecimento.

A regulamentação portuguesa adota como temperatura base, para manter o conforto térmico na estação de arrefecimento, uma temperatura interior de 25 °C, pelo que o sistema global de uma habitação deve ser suficientemente eficiente para manter dita temperatura e manter o balanço térmico embora existindo trocas de calor. Com base ao anterior devem ser calculadas as necessidades de energia útil para arrefecimento destinada a expulsar as massas de ar quente do ambiente interior.

Para conhecer o valor das necessidades de energia útil para arrefecimento (N_{vc}) o Despacho n° 15793-I/2013 indica a aplicação da seguinte expressão indicada em kWh/(m².ano):

$$N_{vc} = (1 - \eta_v) Q_{g,v}/A_p \quad (10)$$

Onde:

η_v – Representa o fator dos ganhos térmicos associados à estação de arrefecimento.

$Q_{g,v}$ – Representa a quantidade de ganhos térmicos brutos acumulados na estação de arrefecimento. Este fator deve ser apresentado em (kWh).

A_p – Representa a dimensão de área útil medida pelo interior dos compartimentos e deve ser expressa em (m^2).

Os primeiros dois termos mencionados demonstram que as necessidades de energia são estimadas mediante a diferença dos ganhos térmicos com as transferências ou perdas de calor, de forma a manter o balanço térmico.

3.3.3.1 Transferência de calor através das envolventes ($Q_{tr,v}$)

Necessária para a determinação do fator de utilização de ganhos térmicos, convertendo a quantidade de ganhos brutos em ganhos úteis. Representa todas as perdas possíveis pelas envolventes com a particularidade de que na estação de arrefecimento o regulamento não considera a contabilização das perdas por envolventes em contacto com edifícios adjacentes. A expressão utilizada para o cálculo deste tipo de transferência de calor é a seguinte:

$$Q_{tr,v} = H_{tr,v} \cdot (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) L_v / 1000 \quad (11)$$

Onde:

$H_{tr,v}$ – Representa o coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de arrefecimento. A esquematização deste coeficiente se pode visualizar na Figura 20. Para determinar este coeficiente é necessário calcular coeficientes de transmissão térmica das diferentes composições das envolventes assim como as pontes térmicas, etc.

$\theta_{v,ref}$ – Refere-se à temperatura de referência apropriada para o ambiente interior para a estação de arrefecimento a que o Despacho nº 15793-I/2013 define com o valor de 25 °C.

$\theta_{v,ext}$ – Refere-se à temperatura média da estação de arrefecimento a qual varia com o local de estudo pelo que deve ser definida aplicando as referências climáticas da Tabela 05 do Despacho nº 15793-F/2013.

L_v – Representa a duração da estação de arrefecimento em horas o que resulta em 2928 horas.

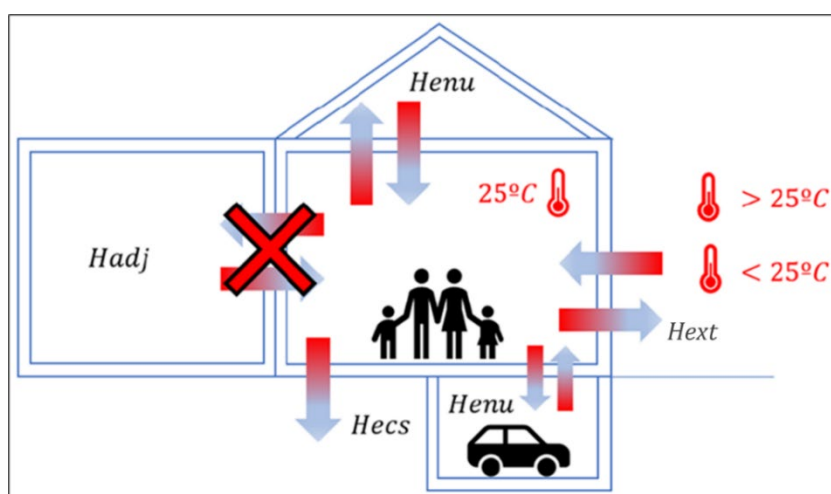


Figura 20 - Transferência de calor das envolventes na estação de arrefecimento, adaptado de [58]

3.3.3.2 Transferência de calor motivada por ventilação ($Q_{ve,v}$)

Como mencionado anteriormente o ar também representa um meio intercâmbio de temperatura importante pelo que o Despacho nº 15793-I/2013 indica que este tipo de transferência deve ser calculado através da expressão:

$$Q_{ve,v} = H_{ve,v} \cdot (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \cdot L_v / 1000 \quad (12)$$

Onde:

$H_{ve,v}$ – Representa o coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento.

3.3.3.3 Ganhos térmicos úteis ($Q_{g,v}$)

É importante ressaltar que a regulamentação considera os ganhos obtidos pelas envolventes opacas durante a estação de arrefecimento, devido a que a alta incidência solar nos elementos exteriores aumenta significativamente a T_i . A diferença do inverno onde o pouco aquecimento por este tipo de envolvente considera-se favorável. A expressão que deve ser utilizada para o cálculo é:

$$Q_{g,v} = Q_{int,v} + Q_{sol,v} \quad (13)$$

3.3.3.4 Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento de referência (N_v)

Imposto pela Portaria nº 349-B/2013 é necessário calcular o valor limite das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento de referência as quais são parametrizadas por valores máximos admissíveis que permitem manter a qualidade térmica do ambiente interior e a eficiência energética dos sistemas técnicos adotados. Uma vez determinada esta necessidade e possível avaliar os valores determinados do chamado “edifício real” verificando assim a regulamentação. A expressão utilizada para determinar (N_v) é a seguinte:

$$N_v = (1 - \eta_{v,ref}) \cdot Q_{g,v,ref} / A_p \quad (14)$$

Onde:

$\eta_{v,ref}$ – Representa o coeficiente de utilização de ganhos de referência indicados na Tabela 05 do Despacho nº 15793-F/2013.

$Q_{g,v,ref}$ – Representa os ganhos térmicos de referência estimado no valor de 0,43 na Portaria nº 349-B/2013. Partindo destes fatores os ganhos térmicos de referência são obtidos através da expressão:

$$\frac{Q_{g,v,ref}}{A_p} = \left[q_{int} \cdot \frac{L_v}{1000} + Q_{v,ref} (A_w / A_p) I_{sol,ref} \right] \quad (15)$$

3.3.4 Necessidades energéticas para a preparação de águas quentes sanitárias

Sendo uma necessidade básica a preparação de AQS na vida quotidiana dos ocupantes de uma edificação ou fração destinada à habitação não deve ser desconsiderada devido a que representa um gasto significativo de energia. A regulamentação estima para efeitos de cálculo que um ocupante consome aproximadamente 40 litros de AQS e que o número de ocupantes de uma fração varia de T0

equivalente a 2 ocupantes e $T_n = n + 1$ ocupante, a temperatura de aquecimento de água implementada é de 35 °C. A expressão utilizada para determinar a quantidade de energia necessária imposta pela regulamentação é a seguinte: (Expressada em kWh/ano)

$$Q_a = (M_{AQS} \cdot 4187 \cdot \Delta T \cdot \eta_d) / 3600000 \quad (16)$$

Onde:

M_{AQS} – Representa o consumo médio diário de referência. Em casos de chuveiros com certificação igual ou superior a (A) o (f_{ch}) é igual a 0,9 caso contrário se considera 1, como no caso do edifício de referência.

ΔT – Representa o aumento da temperatura necessária para a preparação de AQS sendo equivalente a 35 °C.

η_d – Representa o consumo anual em dias sendo equivalente a 365 dias.

3.3.5 Necessidades energéticas para ventilação mecânica

Nos casos onde a ventilação natural não é suficiente para atender às necessidades de renovação de ar adequadas para a habitabilidade é necessário a aplicação de sistemas de ventilação podendo ser de caudal contínuo ou variável. Para determinar o consumo de energia devido a ventiladores deve ser aplicada a seguinte expressão:

$$W_{vm} = \frac{V_f}{3600} \cdot \frac{\Delta P}{\eta_{tot}} \cdot \frac{H_f}{1000} \quad (17)$$

Onde:

V_f – Representa o caudal medio diário escoado pelo ventilador em m³/h (depende da potência do sistema).

ΔP – Representa a diferença de pressão total do ventilador medida em (Pa).

η_{tot} – Representa o rendimento do ventilador.

H_f – Representa o funcionamento do ventilador anual expressado em horas, muitas vezes é adotado um uso de 24 horas diárias o que equivale a 8760 horas anuais. Para sistemas híbridos podem ser adotados outros valores fornecidos pelos fabricantes.

3.3.6 Energias produzidas por fontes renováveis

A aplicação de sistemas alimentados por energias renováveis é obrigatória nos edifícios novos pela regulamentação (SCE), onde se considera que este tipo de energia em edifícios abrangidos pelo (REH) deve ser considerada para satisfazer necessidades de climatização dos espaços interiores e a preparação de (AQS). O objetivo de utilização deste tipo de energia é reduzir o consumo de energias de origem fóssil altamente contaminantes como também reduzir os custos por despesas de energia.

Devido às necessidades de adotar estes tipos de energias o Despacho nº 15793-H/2013 estabelece a metodologia de quantificação do contributo segundo os diferentes tipos de sistemas.

Para determinar as quantidades de energias produzidas por sistemas $E_{ren,p}$ o Despacho nº 15793-H/2013 indica que pode ser utilizado algum programa ou folha de cálculo desde que seja validado pelo Ministério do Ambiente e da Transição Energética. Do caso contrário a quantificação de sistemas de

energias alternativas como: sistemas solar-térmico, eólicos, biomassa, geotermia, mini-hídrica e bombas de calor (somente parcela renovável) as suas contribuições energéticas devem ser calculadas manualmente segundo as expressões habilitadas pelo mesmo Despacho nº 15793-H/2013.

3.4 FERRAMENTAS DE CÁLCULO PARA A OBTENÇÃO DE DETERMINADOS PARÂMETROS

Regulamentarmente o SCE somente menciona a utilização de dois tipos de ferramentas de cálculo que podem considerar-se de uso recomendado: a folha de cálculo “Qventila_RECS_2013_12_10_v01b” desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para a determinação e verificação dos requisitos mínimos de ventilação em edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviço [59] e o programa “Solterm” (desatualizado) que permite determinar as contribuições de sistemas alimentados por energia solar térmica através da simulação numérica de balanço energético com referencia anual (Clima Português) [60].

Para fazer substituição do programa “Solterm” a regulamentação (Despacho nº 10346/2018) disponibiliza mediante o portal da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), a folha de cálculo “SCE.ER” que também permite determinar o aproveitamento de energias renováveis em edifícios neste caso para todos os tipos de energias consoante a metodologia estabelecida pelo Despacho nº 15793-H/2013. O funcionamento da folha de cálculo consiste em que mediante o preenchimento de dados de localidade, categoria da edificação, eficiência hídrica das torneiras e a tecnologia renovável a utilizar a folha de cálculo emite um relatório onde apresenta a quantidade de energia necessária para a preparação de AQS dividindo este valor na quantidade necessária por energias convencionais e por energias renováveis [61]. Seguidamente na Figura 21 se apresenta o sumario de um relatório de desempenho emitido pela folha de cálculo “SCE.ER” para uma fração de tipologia T3 localizada na cidade do Funchal com um equipamento solar térmico unicamente aplicado a preparação de AQS.

Instalação em Santo Antonio (Funchal)			Necessidades de energia: AQS regulamentar (REH)			Indicadores principais (sistema solar)		
4 coletores Padrão REH			Energia útil solicitada: 2 376 kWh			rendimento: 40%		
» painel de	2,60	m ² (inclinação 35° e azimute 0°)	- satisfeitas por origem solar	1 140 kWh	48%	de fração solar	produtividade: 439	kWh/m ²
» depósito de	200	l, modelo típico (200 L)	- satisfeitas pelo apoio	1 236 kWh	52%		perdas: 24%	

Figura 21 - Estrato de simulação de desempenho de sistema solar térmico, de SCE.ER

Em referência a folha de cálculo “Qventila_RECS_2013_12_10_v01b” do LNEC esta avalia o desempenho da ventilação do ambiente interior com base na metodologia disposta na Portaria nº 353-A/2013 com esta folha de cálculo e possível obter o caudal de ar novo necessário para as renovações de ar e até estimar concentrações de CO₂. Para a utilização de esta folha de cálculo e necessária a consulta a norma EN13779 para determinar a concentração de CO₂ no exterior e também é necessário o conhecimento de parâmetros como a percentagem de ocupação diária, dimensões uteis da fração em estudo, número de ocupante, sistema de ventilação e outra serie de fatores que podem ser determinados mediante a consulta da Portaria nº 353-A/2013 como a tipologia do espaço e o nível de atividade metabólica dos ocupantes.

Ditas ferramentas mencionadas estão disponíveis de forma gratuita mediante o preenchimento de um formulário.

3.5 FERRAMENTAS DE CÁLCULO PARA APOIO À METODOLOGIA DE CÁLCULO DO SCE

Embora, não de uso obrigatório, existem outras ferramentas de cálculo reconhecidas a nível nacional entre os PQ destinadas a auxiliar os processos de cálculos com numerosos parâmetros. No desenvolvimento desta dissertação serão aplicadas duas dessas ferramentas.

- Ferramenta de cálculo “Avaliação do Comportamento Térmico e do Desempenho Energético dos Edifícios, de acordo com o REH” desenvolvida pelo Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade (Itecons) que nasce com a revogação do antigo SCE (DL78/2006) pelo novo sistema SCE com a finalidade de apoiar aos projetistas que já dominavam as metodologias de cálculo anteriores para a caracterização térmica. A mencionada ferramenta trata-se de uma folha de cálculo onde devem ser preenchidas informações que permitem determinar os dados de balanço energético (metodologia de relação das necessidades energéticas) e dados de caracterização térmica que permitem a determinação de parâmetros como o coeficiente de transmissão térmica (U) que posteriormente devem ser carregados na plataforma da ADENE para a emissão do certificado energético. Em caso de perito qualificado (PQ) pelo SCE até existe a possibilidade de importar esta folha à plataforma da ADENE com a intenção de carregar de forma automática os dados requeridos para o CE, este último recurso só é possível na versão paga da folha de cálculo. A folha de cálculo também está desenhada de forma a emitir outro tipo de informações importantes como: as verificações mínimas de requisitos energéticos, comparação com versões anteriores, medidas de melhoria, estudo de viabilidade económica e é possível emitir o relatório de peritagem obrigatório para o registo do CE no portal da ADENE [62].
- Ferramenta desenvolvida pela Plataforma para a promoção dos nZEB em Portugal (PTnZEB) também é uma folha de cálculo que permite verificar a regulamentação do (SCE) incluindo edifícios aos que se pretende realizar algum tipo de intervenção. A folha permite o cálculo automático de todos os parâmetros necessários para o CE como: o cálculo das necessidades energéticas e até à própria determinação da classe energética, também é importante ressaltar que a sua utilização é gratuita, esta folha tem a capacidade de apresentar uma de forma gráfica e simples os valores de balanço energético como se pode apreciar na Figura 22. [63]

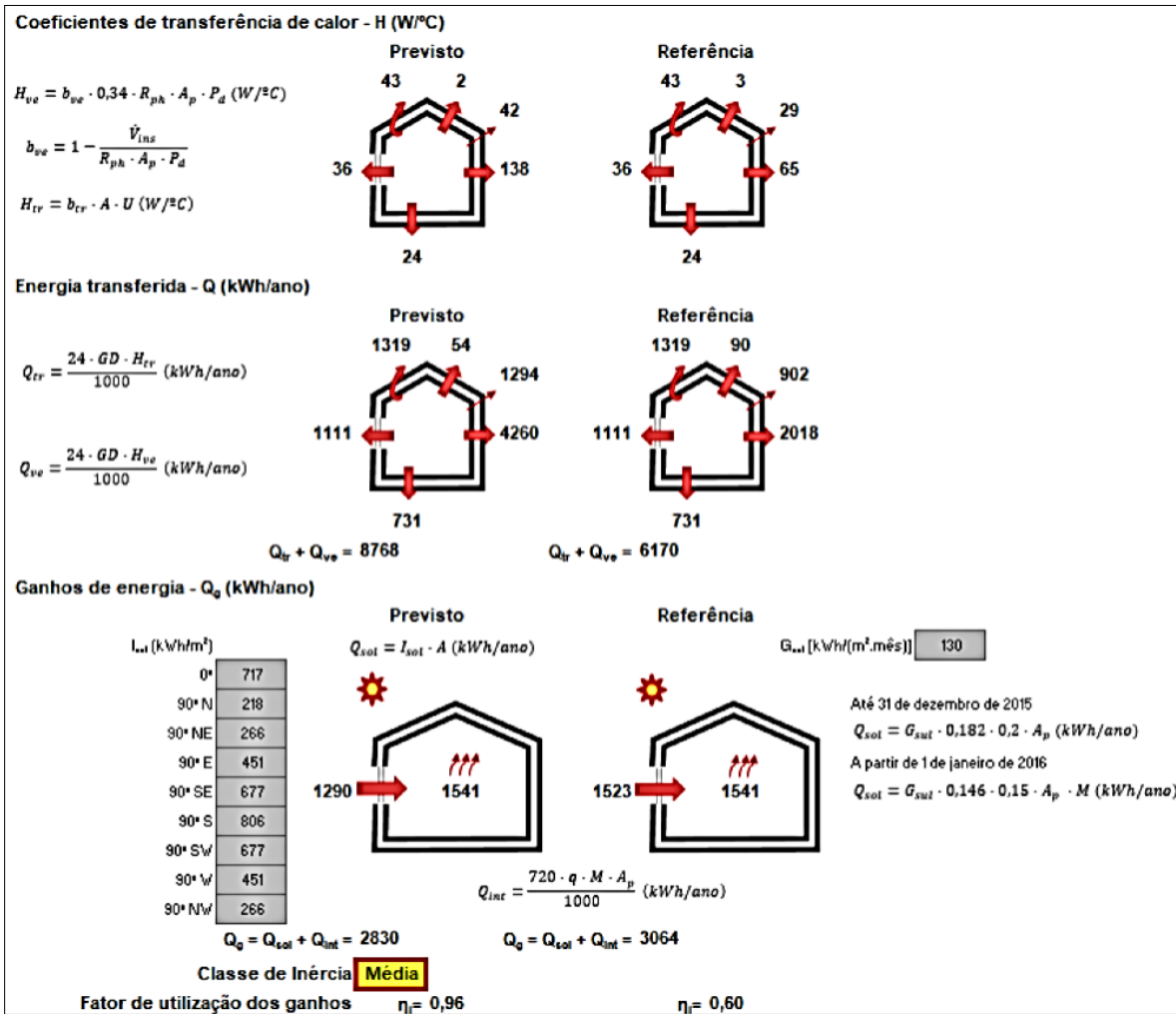


Figura 22 - Determinação de parâmetros de ganhos e perdas com folha de cálculo [64]

Capítulo 4

ANÁLISE ESTATÍSTICA NA ENGENHARIA

A metodologia exposta no capítulo 3 por vezes não consegue abranger todas as possibilidades de casos, pois esta somente trabalha com valores médios, dito isto devem-se aplicar análises estatísticas para avaliar o comportamento da metodologia para casos afastados. Para compreender este tema serão introduzidos neste capítulo alguns conceitos de estatística a utilizar no capítulo 6.

4.1 CONCEITOS GERAIS

No que diz respeito à quantificação do desempenho energético das edificações, as incertezas e variações, podem afetar os valores dos parâmetros responsáveis pela obtenção da certificação energética, como: as variáveis dependentes do utilizador, os fatores climáticos, as propriedades da edificação e a utilização de equipamentos técnicos. Nesta dissertação surge a necessidade de aplicar procedimentos estatísticos de forma a quantificar incertezas mediante a identificação das variáveis com maior influência no resultado final. Estes procedimentos também são aplicados em áreas sensíveis como a medicina, a engenharia nuclear, engenharia estrutural e entre outras, onde deve ser avaliado sempre o grau de fiabilidade e de riscos dos modelos aplicados. [65]

4.1.1 Variáveis aleatórias

De forma simplificada uma variável aleatória (X) associa um valor (número) a subconjuntos que podem ser observados dentro do espaço de resultados (S), sendo assim possível obter um conjunto numérico e inclusive reduzir o número de conjuntos. Por exemplo se é lançada uma moeda três vezes e queremos conhecer a experiência aleatória de cair a face da figura (c) e não a face do valor (k) temos as seguintes possibilidades de acontecimento (A) dentro do espaço de resultados (S) $S = \{ccc, cck, ckc, kcc, kkc, kck, ckk, kkk\}$ então a variável aleatória (X) que associa valores aos conjuntos dos acontecimentos seria $X = \{0, 1, 2, 3\}$ segundo se esquematiza na Figura 23 onde o conjunto numérico continua a ser o espaço de resultado mas dependente da variável aleatória (S_X). [66, 67]

Se uma variável aleatória do espaço de resultados tem características que permite a enumerabilidade de algum conjunto com valores distintos e obter assim um S_X então podemos chamar a esta de “variável aleatória discreta”. [66]

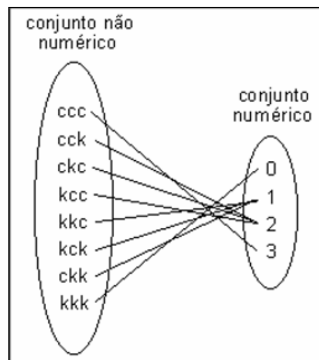


Figura 23 - Representação esquemática de variáveis aleatórias (X) [66]

Se no espaço de resultado dependente da variável aleatória (S_X) os valores não podem ser numerados já que existem infinitas possibilidades e se assumem valores reais dentro de um intervalo, a este tipo de variável aleatória se lhe conhece por “variável aleatória contínua”, e é possível de avaliar quando a variável aleatória se refere algum tipo de experiência de medição (tempo, distância, peso, etc.). Para termos uma ideia gráfica da apresentação das mencionadas variáveis aleatórias podemos observar a Figura 24.

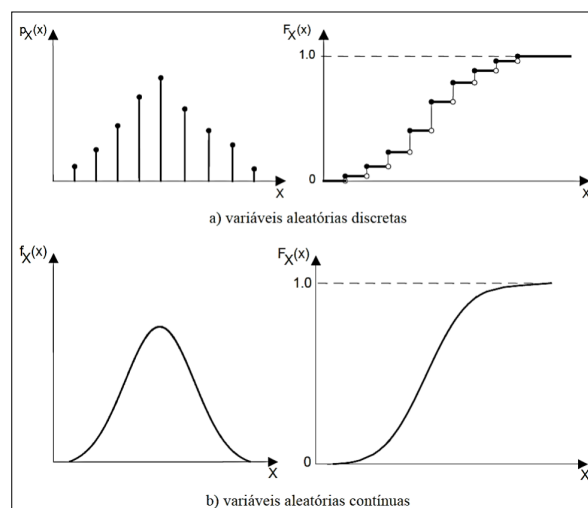


Figura 24 - Apresentação gráfica das variáveis aleatórias [67]

4.1.2 Medidas descritivas populacionais

Para caracterizar e resumir as propriedades da população em análise é necessária a utilização de medidas que são aplicadas nas amostras e definem estatisticamente a população, convencionalmente destacam-se as medidas de localização (resultados do centro da amostra) e as de dispersão (variabilidade de resultados). É importante mencionar que as medidas devem ser aplicadas com precaução e segundo o contexto devido a que o seu valor represente um conjunto de resultados. [68]

As medidas de localização mais comuns são:

- Média: indica o centro da tendência e obtém-se com a expressão $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$, ver Figura 25.
- Moda: corresponde a amostra mais frequente e determina-se de forma analítica com a visualização dos resultados, mas pode-se definir com a expressão $M_O = x_k$.

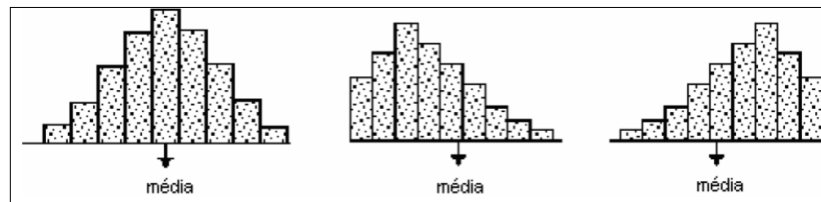


Figura 25 - Histograma com a localização da média [186]

- Mediana: esta divide em partes iguais (50%) um conjunto de valores, seja para casos com conjunto de dados pares ou ímpares, pode-se definir com a expressão $M_d = X_p$ ou $M_o = \frac{X_{p1} + X_{p2}}{2}$ sendo $p = \frac{n+1}{2}$.

As medidas de dispersão mais comuns são:

- Variância: maioritariamente aplicada, esta medida consiste em determinar a média dos quadrados dos desvios com relação à média (\bar{X}) e se deve determinar através da expressão $Var_X = S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}$.
- Desvio padrão: representa a variabilidade dos resultados tomando sempre valores positivos e com as unidades das amostras, para a sua determinação se deve aplicar a expressão $\sigma_X = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ ou simplesmente $\sigma_X = S = \sqrt{S^2}$.
- Coeficiente de variação: também conhecido por dispersão relativa permite avaliar quão longe pode chegar a ser a variabilidade dos dados segundo a sua localização em relação à média, a expressão utilizada para o cálculo é $CoV[X] = CV = \frac{S}{\bar{X}}$. Este tem características adimensionais e é determinado pela relação do desvio padrão pelo valor médio
- Amplitude: pode ser denominada como uma medida simples de determinar a variabilidade entre o resultado máximo e mínimo da amostra, mas também pode ser muito sensível quando a amostra apresenta valores máximos ou mínimos muito afastados dos valores de todo o conjunto, pode então representar-se com a expressão $Range = R = x_{max} - x_{min}$.

As medidas maioritariamente aplicadas às variáveis aleatórias são a média e a variância, sendo a primeira (μ_X) conhecida também como valor esperado ou também como esperança matemática $E[X]$ e a sua função é determinar os valores probabilísticos centrais, enquanto que a variância $Var[X]$ e desvio padrão σ_X avalia a distância dos resultados ao valor esperado. A formulação para aplicar estas medições se pode observar na Tabela 3.

Tabela 3 - Expressões de valor medio e variância

Tipo de variável aleatória	Valor Médio	Variância
Variáveis aleatórias discretas	$\mu_X = E[X] = \sum_{i=1}^n p_X X_i(X_i)$	$\sigma_X^2 = Var[X] = E[(X - \mu_X)^2]$ $= \sum_i p_X(X_i) \cdot (X_i - \mu_X)^2$
Variáveis aleatórias contínuas	$\mu_X = E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f_X(x) dx$	$\sigma_X^2 = Var[X] = E[(X - \mu_X)^2]$ $= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X)^2 \cdot f_X(x) dx$

4.1.3 Funções de distribuição correntes de variáveis aleatórias

Para estudos de engenharia os modelos contínuos são os mais aplicados devido a que as variáveis aleatórias podem tomar qualquer valor num intervalo infinitesimal dado pela área que possa desenvolver a sua função de densidade. Para caracterizar uma variável aleatória do tipo contínua é necessário estudar a sua variação num dado intervalo de valores, para o que podem ser aplicados distintos tipos de modelos como os que se explicam a seguir.

4.1.3.1 Modelo de distribuição uniforme

Indica que existe igual probabilidade de ocorrência de qualquer resultado desde que esteja dentro do intervalo $[\alpha, \beta]$ da amostra como se apresenta na Figura 26 (função constante). Se os valores de uma variável se encontram dentro de algum subintervalo e outra dentro de outro subintervalo de tamanho igual então a distribuição de probabilidade é também uniforme.

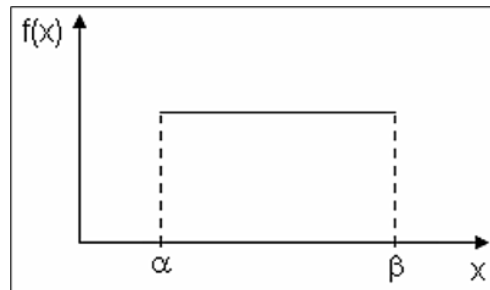


Figura 26 - Intervalo da amostra [66]

Então conhecendo o anterior mencionado pode-se dizer em forma de expressão matemática que

a função de densidade de probabilidade $f_{(X)}$ é definida por $f_{(X)} = \begin{cases} \frac{1}{\beta-\alpha} & \text{onde } \alpha \leq X \leq \beta \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$ sendo assim

é calculada por integração ou área a função de distribuição $F_{(X)}$ dada por $F_X = \begin{cases} 0, & X < \alpha \\ \frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}, & \text{se } \alpha \leq X \leq \beta. \\ 1, & X > \beta \end{cases}$

Algumas das medidas descritivas para a distribuição uniforme são apresentadas na Tabela 4

Tabela 4 - Medidas descritivas para distribuição uniforme

Média	Variância
$E_{[X]} = \mu = \frac{(\beta + \alpha)}{2}$	$Var_{[X]} = \sigma^2 = \frac{(\beta - \alpha)^2}{12}$

4.1.3.2 Modelo de distribuição normal

Também conhecida como distribuição gaussiana, é muito aplicada na estatística pela sua possibilidade de modelar fenómenos com base a pressuposições de forma muito aproximada à realidade. A sua distribuição de probabilidade está parametrizada pelo valor medio (μ) ou valor esperado e desvio padrão que se encontra esquematizado na curva simétrica de Gauss a qual se apresenta na Figura 27.

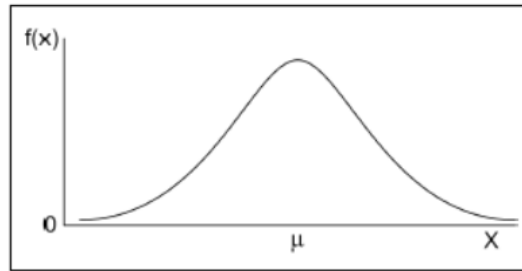


Figura 27 - Curva normal ou de Gauss [66]

Ficando a noção (na maioria das vezes) de que a probabilidade de uma variável aleatória é representada pela área sob a curva sempre que esta respeite a função de densidade de probabilidade, que

deve atender à seguinte expressão matemática $f_{(X)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}}$.

A simetria da curva está diretamente relacionada ao valor médio pelo que para casos onde o valor médio de uma distribuição é diferente de outra mais o desvio padrão é igual a curva terá a mesma forma podendo só mudar a sua posição no eixo (X), no caso contrário para valores de médias iguais, mas variâncias diferentes as curvas poderão ser mais ou menos pronunciadas. Isto pode-se apreciar graficamente na Figura 28.

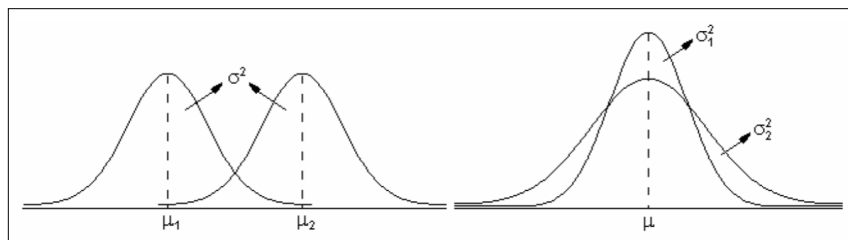


Figura 28 - Simetria da curva de Gauss [66]

Alem disso para determinar a probabilidade acumulada até um ponto (função de distribuição) é necessário conhecer outro padrão que é $\Phi(X) = P(X \leq x)$ o qual pode ser calculado mediante uma

tabela (simplificando o integral) ou então usando a função $F_{(X)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$ sendo o $Z = \frac{x-\mu}{\sigma}$.

As medidas descritivas podem ser obtidas aplicando as funções para variáveis aleatórias contínuas para média e variância da Tabela 3.

4.1.3.3 Modelo de distribuição log-normal

O modelo de distribuição log-normal é muito utilizada na engenharia, em áreas por exemplo como as dos materiais (previsão da vida útil). Este tipo de distribuição tem muita relação com a distribuição normal, conhecendo então que o logaritmo de uma variável qualquer segue uma distribuição normal à qual possui parâmetros como o valor médio (μ) e desvio padrão (σ), então é possível analisar uma série de variáveis pela distribuição normal calculando o logaritmo de cada uma delas como $Y = \log(X)$. [69, 70]

Os valores das variáveis para aplicar este tipo de distribuição são sempre positivos ($0 < X < \infty$) embora não seja simétrica a curva em esta distribuição a simetria da curva se acentua mais quando os

valores de desvio padrão são mais pequenos e o valor medio aproxima-se de 1, ver Figura 29. De igual forma que na distribuição normal a função de densidade de probabilidade está sujeita aos parâmetros de valor médio e desvio padrão e se pode simplificar em termos matemáticos como $f_{(X)} =$

$$\frac{1}{X\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(X)-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

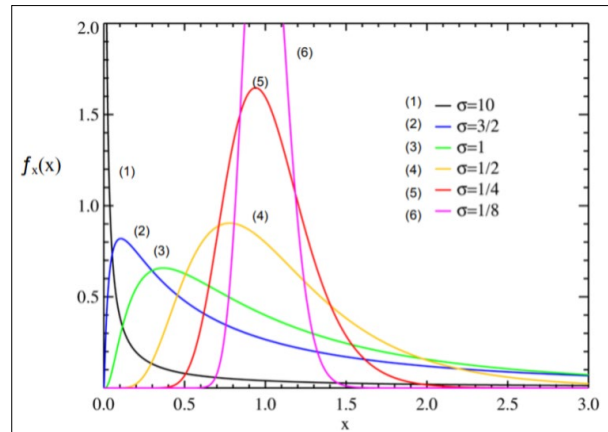


Figura 29 - Distribuição log-normal com diferentes valores de (μ) e (σ) [71]

4.1.4 Método de Monte Carlo

Antes de definir esta metodologia é necessário conhecer a diferença entre um modelo estocástico e um modelo determinístico, sendo o primeiro aplicado em condições onde não é possível determinar o resultado mesmo conhecendo o procedimento de execução, pelo que a única hipótese é estudar as possibilidades de ocorrência de um ou vários resultados possíveis é aplicando a teoria estatística (função de distribuição). No caso dos modelos determinísticos os resultados são obtidos com base em observações históricas (experiência) não usando a probabilidade, aqui existe a possibilidade de conhecer de antemão o comportamento de um resultado, mas desconhecendo erros ou variações [66]. Geralmente um processo determinístico é modelado analiticamente devido ao conhecimento de todas as suas variáveis de entrada, somente em alguns casos mais complexos é necessária a aplicação de simulações devido as numerosas variações que pode sofrer um problema.

L. Gelder [65] segundo a sua revisão bibliográfica indica que que o Método de Monte Carlo é dos mais idóneos para calcular índices de sensibilidade em trabalhos desenvolvidos sobre física das edificações, embora também refira que o Método de Morris é muito eficiente para modelos com numerosas variáveis.

De forma a obter aproximação de resultados devido à complexidade de aplicar métodos analíticos ou determinísticos ou simplesmente por desconhecimento de parâmetros, podem-se aplicar metodologias de simulações, como é o caso do Método de Monte Carlo (MMC). Dita metodologia consiste na obtenção de resultados (aproximados a realidade) provenientes de numerosas simulações (dados aleatórios), tantas como forem necessárias para atingir um bom nível de confiança e resolver assim acontecimentos que não podem ser avaliados deterministicamente [72]. Por exemplo F. Ribeiro [73] aplicou esta metodologia em primeira instancia às estruturas com a intenção de quantificar a sua

robustez quando estas são solicitadas por sismos consecutivos, pelo que realizou algumas simulações utilizando diferentes acelerogramas de sismos e réplicas, e combinações entre ambos de forma a obter um número de colapsos que podia permitir o cálculo da probabilidade de rotura.

O processo de modelação para desenvolver esta metodologia é formado nas seguintes fases:

- Identificação das variáveis aleatórias contidas numa função as quais representam os parâmetros de incertezas, as mesmas devem ser caracterizadas pelas funções de densidade correspondentes, e as medições descritivas das suas distribuições as quais devem ajustar-se a um tipo de teste estatístico.
- Definição de valores aleatórios consoante a distribuição de probabilidade de cada uma das variáveis.
- Iniciação da modelação mais a verificação das mesmas por comparação com resultados reais conhecidos.
- Análise das simulações e o seu grau de confiança.

4.2 TIPOS DE ANÁLISES

As análises estatísticas são aplicadas para alcançar um conhecimento mais rigoroso de um problema com base numa metodologia existente. Por vezes os parâmetros que definem um acontecimento (problema) são obtidos com incertezas pelo que pode ser útil considerar variados cenários de parâmetros possíveis. Em outras circunstâncias é possível ter uma precisão paramétrica confiável, mas é o problema que pode mudar constantemente pelo que é preciso obter uma resposta para cada caso.

4.2.1 Análise de Sensibilidade

Consiste numa metodologia que permite identificar as variáveis mais relevantes que podem interferir no sucesso de um determinado projeto ou acontecimento. Permite também analisar resultados provenientes de simulações quando existem alterações de distribuições e parâmetros. De forma genérica esta metodologia analisa a vulnerabilidade que pode adotar um resultado conforme a alteração de um dado ou variável que permite a determinação do mesmo. Por exemplo se a variabilidade de um dado altera consideravelmente o resultado final, então pode dizer-se que a metodologia ou projeto a ser avaliado é sensível a esse dado.

Em muitos casos a variabilidade de um parâmetro depende da incerteza. Um exemplo em matéria de certificação energética seria: se um PQ necessita determinar a qualificação energética de uma edificação existente e depara-se com um sistema técnico para a preparação de AQS muito antigo e sem nenhum tipo de dados técnicos, este deve estimar mediante o seguimento da norma a eficiência energética do mesmo, o que representa um dos indicadores energéticos para calcular o balanço energético do edifício podendo comprometer assim a qualificação final.

Em resumo a análise de sensibilidade pode ajudar a compreender a vulnerabilidade de desenvolver um projeto que depende de uma modelação conseguindo:

- Identificar a dependência do resultado final de uma variável.
- Controlar as variáveis identificadas anteriormente.
- Avalia em geral a sensibilidade de um modelo.

Nesta dissertação a análise de sensibilidade pretende estudar variações no resultado da qualificação energética referentes aos pesos das consequências que possam ter parâmetros referentes às envolventes opacas (por exemplo no tipo de isolamento), vãos envidraçados, localização e orientação da edificação e utilização de sistemas técnicos. Os parâmetros a ser dinamizados serão os mais relevantes e a sua identificação será realizada por meio de pesquisa bibliográfica ou por cálculo imediato tomando como referência a função que determina a qualificação energética e mediante variações aplicadas.

Palme [74] na sua revisão bibliográfica indica que as análises de sensibilidade aplicadas a metodologias de certificação energética estão focados a abordar temas como: a afinação de metodologias mediante a utilização de simuladores através de medições de variáveis sensíveis ou com incertezas em edificações existentes, verificação da transparência da obtenção de resultados mediante a utilização de ferramentas de cálculo existentes no mercado, e por último alguns artigos que abordam a possibilidade de inserir um resultado de consumo energético de sensibilidade a ferramentas de cálculo.

4.2.2 Análise Paramétrica

É uma fonte interessante e direta de avaliar o comportamento de uma função de forma a abrir caminho no conhecimento das variáveis mais relevantes de um modelo, que podem vir, ou não, a ser estudadas mediante aplicação de outras análises segundo o nível da investigação pretendida. Convenientemente este tipo de análise deve ser aplicada quando se tem uma amostra compatível com o modelo de distribuição normal. Embora esta análise permite alterar qualquer variável de entrada, é essencial, mas não obrigatório, que cada variação se faça de forma isolada para evitar o esforço computacional. Por vezes este tipo de procedimentos adota uma série de suposições que permitem adaptar uma população a um tipo de distribuição (distribuição normal). [75]

Neste tipo de análise pretende-se estudar de forma gráfica a variação da variável de saída (resultado) com respeito à variável de entrada (parâmetro).

4.2.3 Análise de Robustez

Se entende como análise de robustez o processo de avaliar a contrariedade de um resultado (resultado não esperado) proveniente de um modelo, quando este é sujeito a uma certa variabilidade em um ou mais parâmetros principalmente quando são aplicadas diferentes funções [72]. Pode-se dizer então que um modelo pode ser robusto conforme a estabilidade do seu resultado.

D. Abreu [72] indica que depois de rever alguns estudos que aplicam a análise de robustez desenvolvidos pelo “*Joint Research Group*” verificou que não existe uma definição oficial de robustez, mas em todos os procedimentos efetuados se estuda a estabilidade dos resultados após a variação paramétrica.

F. Ribeiro [73] associa o conceito de robustez com o conceito de resiliência, embora este último seja mais generalizado, destaca este conceito como a capacidade de um modelo se recuperar após uma modificação imprevisível.

O propósito de analisar a robustez de um modelo segundo B. Roy [76] parte da identificação dos pontos fracos das formulações ocasionados por incertezas. Os pontos fracos estão relacionados a:

suposições de valores na existência de incertezas, inadequada interpretação de valores, avaliações pouco rigorosas do fenômeno em estudo, adoção de parâmetros que podem afetar a construção do modelo com base ao fenômeno real, adoção de parâmetros por metodologias pouco eficientes motivado a limitações na investigação, etc. B. Roy [76] define a análise de robustez como a capacidade de um modelo suportar “aproximações vagas ou zonas de ignorância”. Este autor também defende a possibilidade de que a metodologia de análise de robustez seja conhecida por “*robustness concern*” ou “preocupação da robustez” por motivos que podem ser consultados nesta referência.

É relevante conhecer e quantificar as incertezas de um modelo de forma a conhecermos quanto afetado é o resultado e as possibilidades de otimizar a metodologia construída. Nesta dissertação as incertezas do modelo serão representadas com a função de densidade de probabilidade de certas variáveis ou com a função de distribuição acumulada, de forma avaliar as possibilidades de ocorrência de uma variação.

Uma das metodologias aplicadas para simular o acontecimento das incertezas é o MMC definido neste capítulo, o MMC através de numerosas simulações permitirá determinar o intervalo que representará as incertezas das variações no resultado final. O grau de fiabilidade dos valores dentro do intervalo será maior quando mais numerosas sejam as simulações.

Existem vários tipos de parâmetros que podem comprometer a robustez de um modelo. Zang et al. [77] indicam que os parâmetros mencionados podem ser identificados como: fatores de sinal, de ruído e de controle. Sendo assim, tomando como base o experimento Taguchi [70] estes afirmam que nem todos os parâmetros que causam variabilidade podem ser dominados.

Mencionado o anterior é importante definir que um fator de controle se refere àqueles que uma pessoa pode controlar ou configurar, como por exemplo, a seleção de um tipo de material. O fator de ruído circunscreve aqueles de difícil controle e determinação como por exemplo dados climáticos como a temperatura ambiente. A maioria destes fatores são estimados por probabilidade. O fator sinal refere-se ao intervalo definido controlado pelo usuário para estabelecer o que pode-se chamar de qualidade do sistema, por exemplo determinar que a temperatura de um espaço interior habitável deve estar entre 18°C a 25°C.

Conhecendo o conceito da análise de robustez esquematiza-se na Figura 30 o objetivo de uma metodologia robusta onde o ponto grande (fator sinal) identifica os valores esperados e os pontos pequenos (fator de ruído) indicam a distribuição da resposta resultante da variação estatística. O ideal para uma metodologia ou projeto robusto será que a distribuição das respostas estejam o mais perto possível do valor esperado sem alteradas variações como se ilustra no caso da Figura 30 (b) e d)).

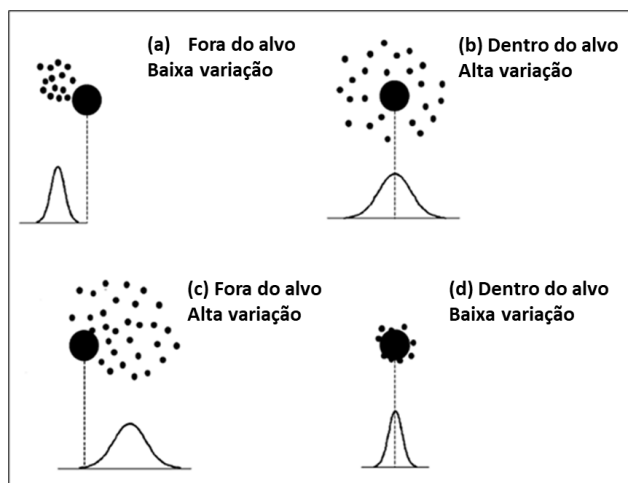


Figura 30 - Diferentes variações de desempenho de um modelo, adaptado de [77]

4.3 RESULTADOS SOBRE PESQUISAS ESTATÍSTICAS NA CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

Ao longo do processo de execução desta dissertação tem-se constatado a existência de diferentes referências onde se aplicam técnicas estatísticas referentes aos distintos tópicos que determinam a certificação energética. Nos parágrafos seguintes sintetizam-se algumas referências consideradas como relevantes.

- A. Curado [78] desenvolve na sua tese de doutoramento uma avaliação sobre a melhor técnica de intervenção de reabilitação com base no conforto térmico e a eficiência energética em edifícios multifamiliares de carácter social. Um dos procedimentos mais relevantes consistiu em avaliar as reabilitações aplicadas a edifícios mediante uma simulação numérica de mudança de localização geográfica, quantificando assim a sensibilidade de cada reabilitação por meio de um coeficiente de desconforto térmico associado ao isolamento das paredes externas e a ventilação noturna. As reabilitações promovidas permitem manter o conforto térmico dos espaços interiores sem a necessidade de acondicionamento do ar interno (aquecimento ou arrefecimento por sistemas técnicos).
- C. Araújo, M. Almeida e L. Bragança [79] avaliaram a influência de alguns parâmetros sobre a eficiência energética dos edifícios, este estudo foi aplicado na antiga regulamentação portuguesa sobre o comportamento térmico de edifícios “RCCTE”. Através de uma metodologia que implicou a utilização de uma análise paramétrica sobre um caso prático (edifício unifamiliar) simularam-se diferentes soluções (alto, médio e baixo desempenho) praticadas em Portugal. O resultado da análise permitiu a discussão da influência de diferentes parâmetros sobre o resultado final da classificação energética sendo que os autores indicam que: embora os coeficientes de transmissão térmica e o fator solar dos vãos envidraçados apresentem uma influência significativa nas necessidades de aquecimento e arrefecimento estes não representavam grande peso na alteração do valor total de necessidade de energia primária ao contrario dos parâmetros referentes aos sistemas técnicos (AQS, acondicionamento do ar). A anterior conclusão não significa que os fatores menos influentes como o coeficiente de transmissão térmica para determinar o resultado da classificação energética sejam

menos importantes, pelo contrário, estão focados em manter o bom conforto térmico do ambiente interior nas estações de aquecimento e arrefecimento e não devem ser desconsiderados.

- L. Gelder [65] com base na sua experiência na área de desempenho energético de edifícios e conhecendo a influência das incertezas que provêm das metodologias determinísticas para calcular a eficiência energética de uma edificação, propõe uma metodologia probabilística através de simulação estocástica (MMC), de forma a evitar a maior quantidade de desvios entre um projeto e a realidade. L. Gelder analisa a sensibilidade para determinar a influência dos parâmetros. Neste trabalho indicam-se recomendações e valores admissíveis de parâmetros destinados a um projeto robusto.
- H. Gervásio [80] analisou parametricamente o desempenho energético de uma edificação de habitação construída com a tecnologia de estrutura leve de aço (LSF). Sendo o objetivo mais destacado a avaliação do desempenho térmico perante a alteração de regiões climáticas. A análise efetuada foi feita tanto para valores médios das diferentes regiões climáticas nas estações de aquecimento e arrefecimento, como também para valores extremos (desvio padrão). As indicações finais referem a variação de temperatura do ambiente interior para as diferentes localidades adotadas.
- E. Sivila [81] desenvolveu uma metodologia simplificada de cálculo aplicada a edifícios de habitação. Dita metodologia foi verificada (mediante medição de desempenho anual de um edifício real e por comparação com a metodologia oficial) e tem um bom nível de confiança tanto que representa um simulador autorizado alternativo para a determinação de certificação energética em Espanha. Basicamente E. Sivila adota valores constantes no que refere à transmissão de calor por condução, temperatura do ambiente interior e a distribuição de energia térmica do espaço interno (radiação e convecção) e realizado pelo método rápido “*Radiant Time Series*”, este método foca o cálculo dos ganhos de energia que aporta cada um dos elementos.
- H. Krstić e M. Teni [82] desenvolvem uma análise estatística onde com base em numerosos dados referentes à eficiência energética e ao consumo de água de edifícios governamentais na Croácia conseguiram avaliar parâmetros térmicos conforme a antiguidade, tipo de construção, tipo de utilização, localização climática, número de utilizadores, etc. Este estudo teve como base determinar os valores médios, desvio padrão, máximos e mínimos de fatores de transmissão de elementos opacos e vãos envidraçados.
- M. Palme [74] avaliou a sensibilidade energética do edifício e do conforto térmico do ambiente interno perante as variações paramétricas provenientes dos elementos “ambiente + edificação”. O principal objetivo deste trabalho foi quantificar a influência que tem os ocupantes sobre a eficiência energética e conforto térmico. A sensibilidade do anteriormente referido é aplicada a dados provenientes do cálculo teórico, dados provenientes por diferentes simuladores e dados com origem em medições reais (durante um ano). Este autor indica que existe menor variação modificando parâmetros de caráter térmico nos simuladores que na metodologia teórica. Também propõe entre outras coisas a aplicação de uma análise de robustez para avaliar a influência da tipologia

arquitetónica sobre o comportamento térmico da edificação já que se estima que as tecnologias tradicionais apresentam menor sensibilidade.

- J. Fonseca [83] executou uma modelação para avaliar o desempenho energético dos edifícios de habitação em Portugal usando como referência a metodologia do REH, e para comprovar a simulação este compara os valores das variáveis adotadas com as fornecidas pela ADENE de forma a obter a precisão frente aos valores reais. Um dos resultados conseguidos indica que a diminuição de 30% nos fatores de transmissão térmica da envolvente permite a subida da qualificação energética num bom número de casos.
- H. Arham [84] pretendeu avaliar a influência dos tipos de arquitetura sobre o consumo energético e conforto térmico mediante a simulação de variáveis referentes à radiação do sol, ventilação e temperatura externa (medições reais). A intenção foi desenhar uma envolvente eficiente para permitir o controle térmico e a redução do consumo energético.
- S. Pinheiro [85], muito semelhante ao trabalho anterior mas aplicando a regulamentação portuguesa antecedente (RCCTE), a intenção de igual forma foi avaliar as condições térmicas, mas esta vez em conformidade com os tipos de soluções construtivas (envolventes e sistemas de acondicionamento do ar). A avaliação desta investigação foi executada mediante uma análise paramétrica. Este trabalho ressalta também a elevada influência dos sistemas térmicos sobre a qualificação energética de edifícios de habitação.
- G. Costa [86] analisou (situações hipotéticas fora da média) a sensibilidade de alguns parâmetros referentes à metodologia de cálculo do REH aplicado a um caso prático (edifício real) com a intenção, entre outras coisas, de determinar a existência de sobreaquecimento na estação de arrefecimento. Como resultado este autor indica que durante a estação de aquecimento as necessidades de energia útil para aquecimento são mais elevadas embora os parâmetros estejam dentro dos valores admissíveis regulamentares de fator solar nos envidraçados. Mas todo o contrário se são respeitados os valores admissíveis de transmissão térmica das envolventes. Na estação de arrefecimento valores comuns de fator solar causam o aumento das necessidades de energia útil para esta estação, mas não é muito significativo no valor global anual.
- S. Foroushani [87] pretendeu avaliar a influência das incertezas paramétricas no regulamento “*British Columbia Energy Step Code*” aplicado a edifícios novos numa região do Canadá. Neste trabalho foi indicada (mediante resultados de simulações) que as incertezas representavam um peso muito elevado para alcançar as metas de desempenho pelo que sugere uma revisão deste regulamento.
- J. Alves [88] abordou a possibilidade de relação do gasto energético com edifícios de iguais características estruturais mediante a aplicação de algoritmos de inteligência artificial. Também pretendeu determinar o consumo energético destinado a manter o balanço térmico aplicando um modelo computacional com base na rede neuronal artificial. Este autor ressalta dificuldade em obter

resultados para estimar a energia necessária para a estação de arrefecimento como também menciona que a altura do edifício representa um fator condicionante sobre o consumo energético do edifício.

- A. Galimshina, et al. [89] desenvolveram uma metodologia para verificar a robustez de intervenções de reabilitação de edifícios para melhoramento do desempenho ambiental. Após a avaliação das metodologias de reabilitação (análise de custo e ciclo de vida) foi aplicada a análise de robustez na metodologia predefinida, sendo que a substituição dos sistemas técnicos de aquecimento representa para as condições climática Suíças o método mais económico e robusto no âmbito do desempenho ambiental.
- F. Shahsavari, W. Yan e R. Koosha [90], de forma a otimizar a energia na edificação, pretenderam tratar as incertezas referentes às mudanças climáticas, comportamento dos ocupantes e durabilidade dos materiais com a aplicação de análise de sensibilidade. Neste trabalho foi mencionado que os parâmetros referentes ao comportamento dos ocupantes, como abrir e fechar as janelas, eram mais sensíveis que os parâmetros térmicos das envolventes opacas para alcançar a otimização energética num projeto de edificação.
- T. Picard, T. Hong, N. Luo, S. Hoon Lee e K. Sun [91] basicamente o objetivo deste trabalho foi similar ao anterior com a diferença de que a análise é feita a edifícios projetados com ZEB e a intenção foi determinar a robustez desta metodologia obrigatória em edifícios novos no estado da Califórnia. Nesta análise foi demonstrada a maior relevância dos parâmetros do comportamento dos ocupantes, maior do que a mesma mudança climática.
- R. Koosha e F. Shahsavari [92] neste trabalho analisaram também as incertezas referentes à envolvente externa da edificação (espessura das paredes, coeficiente de transmissão térmica, inércia térmica) procurando determinar os parâmetros mais sensíveis através de simulações estacionárias e dinâmicas e concluindo uma similitude dos resultados em ambas.
- C. António, H. Santos, R. Oliveira e E. Fernandes [93] aplicaram análises mediante simulação de Monte Carlo e metamodelação de forma a determinar a importância e sensibilidade de alguns parâmetros construtivos (caraterísticas da edificação, áreas, paredes, pavimentos e coberturas) sobre medidas de poupança de energia. Este tipo de modelação é muito eficiente para determinar o tipo de intervenções aplicadas a um número amplo de edificações por exemplo em um local determinado.
- C. Favi, E. Di Giuseppe, M. D’Orazio, M. Rossi e M. Germani [94] avaliaram a robustez de uma metodologia probabilística aplicada a um caso prático para conhecer o processo de reabilitação mais viável no ponto de vista do ciclo de vida da construção.
- J. Adamczyk e R. Dylewski [95] procuram contabilizar os efeitos ecológicos da produção de materiais de isolamento versus o efeito ecológico da utilização de isolamento nas edificações. Este estudo foi possível através da análise das variáveis que intervêm em cada um dos casos.
- P. Im, R. Jackson, Y. Bae, J. Dong e B. Cui [96] quantificaram a poupança energética de quatro casos práticos após aplicação de diferentes intervenções de reabilitação (simulação) sendo que para

o caso mais crítico, onde a quantificação de incertezas foi superior ao valor de poupança energética anual e foi estimado entre 18% e 51%.

- A. Figueiredo, J. Figueira, R. Vicente e R. Maio [97] neste artigo executaram uma análise de sensibilidade para avaliar as incertezas que podem piorar a aplicação de uma metodologia como é a “*Passive House*” no âmbito da eficiência energética e o conforto térmico no território português. A modelação foi do tipo dinâmica executada com um programa altamente reconhecido (EnergyPlus software) onde a edificação em estudo é dividida por zonas térmicas para depois serem analisadas. Foram simulados diferentes tipos de cenários desde a aplicação de diferentes sistemas técnicos até comportamentos dos utilizadores entre outros. Foi definido que o edifício base (edifício em LSF com ventilação natural e localizado em Aveiro) sofria de períodos com desconforto térmico em ambas estações, pelo que foi aplicada uma solução híbrida com sistema técnico de alta eficiência.
- R. Gagnon, L. Gosselin e S. Decker [98] estudaram a sensibilidade de 30 variáveis da etapa de projeto que poderiam afetar o conforto térmico e o desempenho energético de uma edificação. Em primeira instância chegaram ao resultado que as variáveis referentes ao desempenho térmico tinham pouca influência na determinação anual de energia face aos dos sistemas técnicos, mas analisando o motivo (aquecimento e arrefecimento) pelo qual a energia era consumida as variáveis pouco consideradas ganhariam terreno.
- P. de Wilde [99] realizou um estudo probabilístico com a intenção de aprofundar a influência de três meios (modelos de eficiência, inteligência artificial e conformidade legislativa) pelo qual apresenta grandes diferenças no consumo de energia entre a consumo de energia de cálculo (previsto) e as medições reais. Sendo que a diferença com a realidade é relevante devido à difícil quantificação das numerosas incertezas nas etapas de projeto.

Capítulo 5

CASOS DE ESTUDO

Após a apresentação nos capítulos anteriores dos conceitos gerais sobre esta temática, neste capítulo apresentam-se as edificações que serão objeto de estudo no capítulo seguinte. Os edifícios mencionados são de carácter habitacional e do tipo existentes (casos reais), uma habitação unifamiliar e uma multifamiliar, todas localizadas na Região Autónoma da Madeira (RAM) uma na zona norte e outra na zona sul.

5.1 INTRODUÇÃO

De forma a ser possível a determinação das classes energéticas dos casos de estudo, estas serão calculadas com apoio das folhas de cálculo elaboradas pelo PTnZEB e itecons. Pretende-se também que com recurso às mesmas folhas de cálculo seja possível efetuar análises de sensibilidade e paramétricas de forma analisar a influência dos diversos parâmetros, assim como uma avaliação final da robustez da metodologia de cálculo das classes energéticas.

No que refere à recolha de informação das habitações como: orientação das envolventes, levantamento dimensional, características das envolventes opacas e envidraçadas, elementos arquitetónicos relevantes como sombreamentos, sistemas técnicos, entre outras informações foram obtidas para a habitação unifamiliar através do projeto de execução e das telas finais, enquanto a habitação multifamiliar os dados foram obtidos mediante vistoria no local. Note-se que na determinação de alguns parâmetros para edifícios existentes podem adotar-se algumas simplificações abrangidas pelo Despacho n.º 15793-E/2013: “regras de simplificação a utilizar nos edifícios sujeitos a grandes intervenções, bem como existentes”, mas por este ser um trabalho científico estas simplificações não serão adotadas de forma a ter-se controlo de todos os parâmetros que possam afetar a classificação energética de uma habitação.

5.2 DESCRIÇÃO SUMÁRIA DOS EDIFÍCIOS

Na escolha das habitações foi tomada em consideração a arquitetura devido a estas serem construções modernas que se vêm executando na RAM durante os últimos anos. A semelhança dos casos de estudo com o parque habitacional existente representa um fator importante na hora de avaliar resultados pretendidos. É importante mencionar que alguns dados relevantes para o preenchimento das folhas de cálculo que permitem determinar o balanço energético não serão incluídos neste documento por proteção de dados e privacidade, tal como dados do promotor da edificação, localizações exatas e

dados de carácter legal da habitação como a caderneta predial etc. No caso de um requerente solicitar o serviço de um PQ para a tramitação do CE é recomendável para uma avaliação ajustada à realidade que seja disponibilizada a documentação que se apresenta na Figura 31 sendo os itens marcados com * imprescindíveis para o processo.

DOCUMENTO	ONDE O PODE ENCONTRAR OU SOLICITAR
<input type="radio"/> <i>Caderneta Predial Urbana *</i>	Portal das finanças ou numa repartição local
<input type="radio"/> <i>Certificado da Conservatória do Registo Predial *</i>	Predial online ou numa conservatória do registo predial
<input type="radio"/> <i>Projeto de Arquitetura</i>	Câmara Municipal
<input type="radio"/> <i>Projeto de comportamento térmico</i>	Câmara Municipal
<input type="radio"/> <i>Projeto de especialidades (estruturas, águas e esgotos, sistemas técnicos, etc...)</i>	Câmara Municipal
<input type="radio"/> <i>Livro de Obra</i>	Câmara Municipal
<input type="radio"/> <i>Ficha técnica da habitação</i>	Câmara Municipal
<input type="radio"/> <i>Licença de Construção e/ou Licença de Habitabilidade</i>	Câmara Municipal
<input type="radio"/> <i>Especificações técnicas dos materiais e/ou sistemas construtivos utilizados</i>	Promotor, Empreiteiro, Fabricantes dos materiais
<input type="radio"/> <i>Fichas técnicas dos sistemas/equipamentos instalados (climatização, águas quentes sanitárias, renováveis, etc.)</i>	Fabricantes e instaladores dos sistemas ou equipamentos
<input type="radio"/> <i>Contrato de manutenção do sistema solar</i>	Instaladores dos sistemas
<input type="radio"/> <i>Registo de manutenção dos equipamentos instalados</i>	No equipamento ou num registo documental
<input type="radio"/> <i>Fichas de inspeção de sistemas de ar condicionado e/ou caldeiras</i>	No equipamento ou num registo documental

Figura 31 - Documentação necessária para a emissão do CE [152]

5.2.1 Habitação M1

Trata-se de uma habitação unifamiliar isolada como pode-se ver no Figura A 1, com tipologia T3 e com uma arquitetura moderna onde ressalta-se a existência significativa de vãos envidraçados. A habitação foi edificada no ano 2011 no concelho de São Vicente (zona norte da Região Autónoma da Madeira). A habitação em causa foi licenciada para respeitar no que refere ao seu comportamento térmico, em conformidade com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios – RCCTE (legislação de 2006).

A edificação é constituída por dois pisos, um andar parcialmente enterrado (Piso -1) onde encontra-se um espaço destinado à lavandaria, arrumos e garagem, enquanto o outro andar (Piso 0) é constituído por uma sala, uma cozinha, duas instalações sanitárias e três quartos, sendo um destes uma suite. Na Figura 32 pode-se visualizar as plantas do Piso -1 e Piso 0 respetivamente.

No que se refere às envolventes da edificação, esta habitação é constituída por paredes exteriores duplas com isolamento preenchendo a caixa de ar, paredes interiores simples, vãos envidraçados com vidro duplo e cobertura em laje de betão mais isolamento.

No que refere aos sistemas técnicos a habitação não possui um sistema de arrefecimento nem de aquecimento do ar interior. Para a preparação de AQS a habitação apoia-se num sistema solar térmico o qual permite o aproveitamento de energias renováveis maioritariamente na estação de arrefecimento.

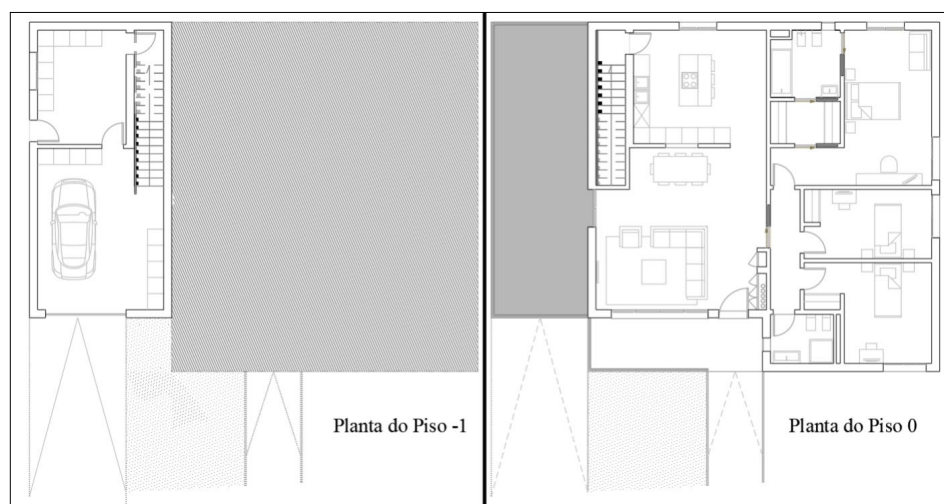


Figura 32 - Plantas da habitação M1, à esquerda o Piso -1 e à direita o Piso 0

Na Tabela 5 apresenta-se em resumo algumas das características mais relevantes desta habitação.

Tabela 5 - Resumo de características da habitação M1

Localização	São Vicente
Tipologia	T3
Orientação da fachada principal	Sudoeste
Altitude	416 m
Proximidade ao mar	≈ 4.7 km

5.2.2 Habitação A1

Trata-se de uma fração autónoma inserida numa moradia multifamiliar composta por um piso de tipologia T2 como pode-se ver no Figura A 7 a qual fica localizada no Concelho do Funchal (zona sul da Região Autónoma da Madeira). Esta edificação foi legalizada no ano 2010 em conformidade com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios – RCCTE (legislação de 2006).

O apartamento destinado à habitação é composta da seguinte forma: dois quartos de dormir (sendo um tipo suite), duas instalações sanitárias, cozinha e sala. A fachada principal está orientada ao sul em contato direto com o exterior, as fachadas este e oeste tem contato direto com fração adjacente e com edifício adjacente respetivamente, a fachada norte contacta com uma fração autónoma adjacente e com o espaço comunitário onde se encontra os elevadores e escadarias.

Em referência à envolvente da habitação esta possui uma envolvente opaca composta por paredes exteriores duplas mais isolamento e paredes duplas mais caixa de ar e paredes simples em contato com os espaços interiores com requisitos térmicos, as coberturas e pavimentos não representam requisitos obrigatórios para a classificação energética de edifícios existentes devido a esta fração estar localizada entre outras frações similares. Os vãos envidraçados estão compostos por caixilharias de alumínio e vidro duplo. Os sistemas técnicos da habitação são compostos por um esquentador a gás propano que apoia a preparação de AQS, o aproveitamento de energia renovável não é feito nesta edificação, a ventilação é feita de forma natural, a fração autónoma não possui equipamentos destinados ao arrefecimento e aquecimento do ar interior. A planta desta habitação pode ser visualizada na Figura 33.



Figura 33 - Planta da fração em estudo

Na Tabela 6 apresenta-se em resumo algumas das características mais relevantes desta habitação.

Tabela 6 - Resumo de características da habitação A1

Localização	São Martinho – Funchal
Tipologia	T2
Orientação da fachada principal	Sul
Altitude	226 m
Proximidade ao mar	≈ 1.5 km

5.3 CLASSIFICAÇÃO ENERGÉTICA DOS EDIFÍCIOS

O desempenho térmico das edificações será calculado recorrendo à utilização das folhas de cálculos introduzidas no capítulo 3 de forma a estabelecer a comparação de resultados e conhecer o funcionamento de cada uma destas. As folhas de cálculo permitem de forma mais eficiente determinar o balanço energético das habitações no âmbito do Sistema de Certificação Energética (SCE) representados pelos indicadores energéticos como: as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento e arrefecimento, as necessidades nominais anuais de energia útil para a preparação de AQS, as necessidades nominais anuais globais de energia primária e outras necessidades como a ventilação e o aproveitamento de energias renováveis.

5.3.1 Habitação M1

A informação que se apresenta abaixo são os dados necessários que permitem o apropriado preenchimento da folha de cálculo, a qual de forma automatizada possibilita o cálculo regulamentar aludido no Capítulo 3 da presente dissertação.

5.3.1.1 Zona Climática

O Concelho de São Vicente está localizado segundo a nomenclatura das unidades territoriais para fins estatísticos (NUTS) de nível III na Região Autónoma da Madeira sendo os seus parâmetros climáticos em conformidade ao Despacho n.º 15793-F/2013 os que podem ser avaliados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Parâmetros climáticos da estação de aquecimento da habitação M1

NUTS III	Altitude de referência Z REF [m]	Altitude do local da habitação Z [m]	Número de graus-dias (GD)	Duração da estação de aquecimento (M) [mês]	Temperatura exterior média do mês mais frio da estação de aquecimento ($\theta_{ext,i}$) [°C]	Energia solar média mensal durante a estação (G_{sol}) [kWh/m ² . mês]
RAM	380	416	872	3,31	14,58	105

Tabela 8 - Parâmetros climáticos da estação de arrefecimento da habitação M1

NUTS III	Z REF [m]	Altitude do local da habitação Z [m]	Duração da estação (L_v) [mês]	Temperatura exterior média ($\theta_{ext,v}$) [°C]	Energia solar acumulada durante a estação (I_{sol}) [kWh/m ²]				
					0°	NE 90°	SE 90°	SW 90°	NW 90°
RAM	380	416	4 meses / 2928 h	19,98	580	260	320	320	260

Conhecendo o número de graus-dias (GD) pode-se determinar a zona climática de inverno sendo esta a “Zona I1” e conhecendo a temperatura exterior média ($\theta_{ext,v}$) se identifica que a zona climática de verão é a “Zona VI”

5.3.1.2 Dimensões Geométricas

A orientação das fachadas da habitação foi consultada nas plantas de implantação (Figura A 2) das telas finais do projeto de arquitetura entregue na Câmara Municipal de São Vicente.

A área útil é composta pelo somatório de todas as áreas dos compartimentos considerados úteis medidos pelo interior e descontando paredes internas (Figura A 3) o que representa uma área de 130,83 m². Considera-se a garagem, lavandaria e arrumos (Piso 0) da habitação como um espaço não útil (ENU).

O pé direito da habitação (Figura A 4) para efeito de cálculo representa a média ponderada de todos os compartimentos úteis da habitação, o que neste caso possui 3,0m.

As áreas de compartimento (Figura A 5) são medidas pelo interior não incluindo as paredes de compartimentação. Resultando as medições que se podem observar na Tabela 9.

Tabela 9 - Áreas e pés direitos dos compartimentos da habitação M1

Divisão	Área (m ²)	Pé Direito (m)	% Área	Volume (m ³)
Cozinha	21,13	3,00	16,2	63,39
Sala	36,50	3,00	27,9	109,50
Quarto 1	27,00	3,00	20,6	81,00
Instalação Sanitária 1	6,30	3,00	4,8	18,90
Quarto 2	12,20	3,00	9,3	36,60
Quarto 3	14,80	3,00	11,3	44,40
Instalação Sanitária 2	4,40	3,00	3,4	13,20
Circulação / Escadaria	8,50	3,00	6,5	25,50

Áreas de elementos verticais em contacto com o exterior como vãos, pontes térmicas planas e paredes externas são resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Resumo de áreas (m²) de elementos verticais da habitação M1

Fachadas	Vãos de Janelas	Vãos de Portas	PTP Pilares	PTP Vigas	Paredes
Sudoeste	12,28	2,97	2,20	3,28	18,58
Nordeste	8,36	-	1,65	3,28	26,02
Noroeste	4,94	-	1,65	3,25	29,16
Sudeste	5,12	-	1,65	3,24	28,99

5.3.1.3 Envolvente Exterior

Representa o conjunto de elementos em contato com o ar exterior e o solo. Os diferentes tipos envoltentes encontram-se indicadas na Figura 34. A quadrícula verde representa o pavimento em contato com o solo e o amarelo o pavimento em contato com o ENU, as linhas diagonais vermelhas representam a cobertura diretamente em contato com o ar exterior.

Os elementos da envoltente opaca foram definidos mediante consulta do projeto de desenvolvimento térmico executado para esta habitação e disponível na Câmara Municipal de São Vicente. Embora a consulta, de forma conservativa, não foi considerada por falta de evidência a construção da caixa de ar de 1 cm prevista no projeto nas paredes exteriores para efeitos de cálculo. Dito isto as paredes exteriores são constituídas do exterior para o interior por: alvenaria dupla de blocos furados de betão de agregados de escórias vulcânicas de (0,25 m e 0,10 m), incluindo revestimentos pelo exterior e no interior (uma só face revestida) como apresenta-se na Tabela 11. A cobertura exterior é do tipo pesada formada por uma laje de betão armado de 0,20 m sendo o elemento constituído do exterior para o interior como apresenta-se na Tabela 12. Na Tabela 13 pode-se observar os parâmetros calculados para os elementos exteriores.



Figura 34 - Identificação de envoltentes da Habitação M1

Tabela 11 - Resumo de características de materiais das paredes exteriores da habitação M1

Tipo de material	Massa do elemento [kg/m ²]	Espessura (e) [m]	Resistência térmica (R) [m ² ·°C/W]
Reboco tradicional de cimento	36	0,020	0,015
Bloco de betão leve	200	0,250	0,540
Isolamento térmico em poliestireno extrudido	2	0,060	1,622
Bloco de betão leve	130	0,100	0,270
Reboco tradicional de cimento	36	0,020	0,015

Tabela 12 - Resumo de características de materiais da cobertura exterior da habitação M1

Tipo de material	Massa do elemento [kg/m ²]	Espessura (e) [m]	Resistência térmica (R) [m ² ·°C/W]
Camada de brita	85	0,050	0,025
Isolamento térmico em poliestireno extrudido	3	0,100	2,703
Membrana flexível impregnada com betume	5	0,005	0,022
Argamassa de regularização	90	0,050	0,038
Betão armado de inertes correntes	460	0,200	0,100
Estuque tradicional de gesso	22	0,020	0,035

Tabela 13 - Elementos exteriores da habitação M1

Tipo de Solução	Áreas por orientação (m ²)				Área Total (m ²)	U Solução (W/m ² ·°C)	U referência (W/m ² ·°C)
Parede Exterior	NE	SE	SO	NO	102,68	0,33	0,70
	26,01	28,98	17,23	30,46			
Ponte Térmica Plana - Pilares	NE	SE	SO	NO	7,15	0,50	0,70
	1,65	1,65	2,20	1,65			
Ponte Térmica Plana - Vigas	NE	SE	SO	NO	13,06	0,50	0,70
	3,28	3,25	3,28	3,25			
Cobertura Exterior	157,30				157,30	0,30	0,45
Vão Opaco - Porta	SO		2,97		2,97	3,00	0,70

Para a envolvente envidraçada (Figura A 6) também foi consultado o projeto térmico sendo que estes são compostos por: caixilharia de PVC de correr sem quadrícula, classe 3 de permeabilidade do ar, vidro duplo de baixa emissividade refletante colorido e com proteção interior de cortinas opacas de cor clara. Vidro interior de 4 a 8 mm + câmara de ar de 16 mm + vidro exterior de 4 a 8 mm. O coeficiente de transmissão térmica foi determinado recorrendo ao ITE 50 (Quadro III.3) ($U_{\text{wdn}} = 2,2$ e $2,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$). Para a determinação do fator solar (g_T) é necessária a consulta às tabelas 12, 13 e 20 do Despacho n.º 15793-K/2013 e conhecer as áreas envidraçadas da habitação em estudo (Tabela 14), para a determinação dos fatores de obstrução é necessário determinar os ângulos dos elementos obstrutivos bem seja ao horizonte (α_h°) da edificação (vegetação, edificações adjacentes, etc.) ou por elementos de obstrução da própria arquitetura como palas verticais (β_{esq}° , β_{dir}°) ou horizontais (α°), etc., para a determinação dos ângulos deve consultar-se a metodologia nas tabelas 15, 16, 17, 18 e 19 do Despacho n.º 15793-K/2013. As características dos tipos de vãos envidraçados podem ser observadas na Tabela 15.

Para as envolventes em contacto com o solo não foi possível apurar nenhuma informação, o projeto do comportamento térmico desta habitação não menciona estas envolventes. Devido a isto o PQ deveria aplicar o método de simplificação indicado no Despacho n.º 15793-E/2013 para casos de falta de informação.

Tabela 14 - Resumo de parâmetros de elementos envidraçados da habitação M1

Divisão	Designação da solução	Orientação	Área envidraçada (m ²)	Vão Envidraçado à Face Exterior da Parede?	Permeabilidade de da Caixa de Estore	α°	β_{esq}°	β_{dir}°	g_T	Área do compartimento que serve (m ²)
Cozinha	VE1	Nordeste	3,78	Não	Não tem				0,153	21,13
Sala	VE1	Noroeste	3,64	Não	Não tem				0,153	36,5
Quarto 1	VE1	Nordeste	3,78	Não	Não tem				0,153	27
I.S. 1	VE2	Nordeste	0,8	Não	Não tem				0,261	6,3
Quarto 2	VE1	Sudeste	2,56	Não	Não tem				0,153	12,2
Quarto 3	VE1	Sudoeste	2,56	Não	Não tem				0,153	14,8
I.S. 2	VE2	Noroeste	1,3	Não	Não tem	74		81	0,203	4,4
Quarto 1	VE1	Sudeste	2,56	Não	Não tem				0,153	27
Sala	VE1	Sudoeste	9,72	Não	Não tem	51	27		0,088	36,5

Tabela 15 - Características por tipo de vão envidraçado da habitação M1

Designação do Tipo de Solução	U_{wdn} (W/m ² .°C)	$g_{L,vi}$	$g_{L,T}$	FS Global Prot. Per.	Classe da Caixilharia	Tipo de Vidro	Fração Envidraçada da Fg	U_{Ref} (W/m ² .°C)	Área Total (m ²)	Características
VE Tipo 1	2,20	0,35	0,17	0,35	3	Duplo	0,65	2,80	28,60	C/prote. int.
VE Tipo 2	2,70	0,35	0,29	0,35	3	Duplo	0,65	2,80	2,10	S/prote. int.

Neste caso a simplificação pertinente não foi aplicada pelo que se define um pavimento térreo de acordo com o definido no projeto de arquitetura, onde se visualizou no pormenor arquitetónico uma camada de brita mais uma membrana plástica (1cm) mais isolamento de poliestireno extrudido (XPS) (6 cm) mais a laje térrea de betão (20 cm) com uma camada de argamassa de regularização (4 cm) e como acabamento final um soalho de madeira flutuante (2,5 cm) representando em total uma resistência térmica de 2,052 m².°C/W.

Para as pontes lineares térmicas (PTL) a metodologia do REH baseada na norma EN ISO 10211 indica a consulta a tabela 07 do Despacho n.º 15793-K/2013 onde podem ser encontrados os coeficientes de transmissão térmica linear (ψ), as PTL só devem ser consideradas em envolventes exteriores ou interiores sendo este último em espaços com um coeficiente de redução de perdas (b_{tr}) superior a 0,7. As pontes lineares são medidas pelo exterior ou face em contato com os locais não aquecidos, a Tabela 16 indica os valores de PTL desta habitação.

Tabela 16 - Resumo de PTL exteriores da habitação M1

Tipo de Ponte Térmica	B (m)	Coeficientes de Transmissão Térmica Linear (ψ) [W/(m.°C)]	
		ψ_{Ref} (W/m.°C)	ψ (W/(m.°C))
Fach. com pavimentos térreos	48,25	0,80	0,50
Fach. com pavimento sobre o exterior ou ENU	7,8	0,55	0,50
Fachada com cobertura	52,2	0,70	0,50
Duas paredes verticais em ângulo saliente	14,2	0,50	0,40
Fachada com caixilharia	13,6	0,10	0,20

5.3.1.4 Envolvente Interior

Para as envolventes interiores com requisitos é necessário determinar os coeficientes de redução de perdas (b_{tr}) os quais apresentam-se na Tabela 17, que permitem obter uma aproximação da temperatura de um espaço interno que não é igual à temperatura do exterior nem igual à temperatura dos espaços interiores aquecidos. Para esta habitação o b_{tr} limita-se ao ENU (Garagem/Lavandaria/Arrumos) que representa a totalidade do piso -1. Todas as ligações entre elementos de dito espaço encontram-se bem vedadas e sem aberturas permanentes pelo que se considera de ventilação fraca (f). Quando a determinação da temperatura deste tipo de espaços é de complexa obtenção deve recorrer-se à metodologia exposta na tabela 22 do Despacho n.º 15793-K/2013 como se aplica nesta habitação. Também devem ser determinadas as PTL pelo interior quando necessário (Tabela 18)

Tabela 17 - Coeficientes de redução de perdas da garagem da habitação M1

Área do ENU (m ²)	Pé direito ENU (m)	Volumetria do ENU V_{enu} (m ³)	(A_i) Somatório das áreas dos elementos que separam o espaço interior útil do espaço não útil (m ²)	(A_u) Somatório das áreas dos elementos que separam o espaço não útil do exterior (m ²)	A_i/A_u (m ²)	b_{tr}
47,98	2,50	119,95	27,45	139,80	0,20	1

Tabela 18 - Resumo de PTL interiores da habitação M1

Tipo de Ponte Térmica	C. de Transmissão Térmica Linear (ψ) [W/(m.°C)]	B (m)
Fach. com pavimentos térreos	0,55	5,78
Fachada com cobertura	0,80	5,78

A envolvente interior em contato com o ENU é composta por parede dupla com isolamento térmico no espaço da caixa de ar, um vão opaco (Porta de madeira) e PTP (pilares e vigas) as quais são definidas nas folhas de cálculo. Na Tabela 19 apresenta-se o resumo das áreas destes elementos.

Tabela 19 - Resumo de áreas de elementos do envolvente interior com requisitos da habitação M1

Tipo de Solução	b_{tr}	Área (m ²)	U (W/m ² .°C)	U_{Ref} (W/m ² .°C)
Parede Interior	1	16,14	0,32	0,7
PTP - Pilares	1	0,55	0,5	0,7
PTP - Vigas	1	1,475	0,5	0,7
Vão Opaco - Porta	1	1,64	2,75	0,7

5.3.1.5 Ventilação

A ventilação no caso da habitação M1 é possível mediante a infiltração de ar pelos vãos opacos e envidraçados, a exaustão é feita também pelos vãos envidraçados e pelos exaustores ventax localizados nas instalações sanitárias e cozinha. Em função do exposto a habitação caracteriza-se por ter uma ventilação natural. A folha de cálculo da Itecons possui um separador que permite efetuar o cálculo automático conhecendo previamente as características dos diferentes vãos e condutas de admissão e exaustão, este separador é muito similar à folha de cálculo do LNEC “VENTILACAO_Rph_v02b”. As renovações de ar por estação da habitação M1 podem-se observar na Tabela 20.

Tabela 20 - Resumo de ventilação da habitação M1

Estação de Aquecimento $R_{ph,i}$ (h^{-1})	Estação de Arrefecimento $R_{ph,v}$ (h^{-1})
0,52	0,6

5.3.1.6 Sistemas Técnicos

Para os equipamentos técnicos foi consultado o projeto de comportamento térmico da habitação e o certificado energético já caducado que a mesma possui, assumindo que a habitação não tem efetuado melhorias nos sistemas técnicos.

A habitação possui um equipamento solar térmico unicamente utilizado para a preparação de AQS onde para efeitos de cálculo considera-se um sistema padrão com uma área de coletores de captação de 4 m² com uma produtividade de 386,5 (kWh/m²). O resumo dos sistemas técnicos é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Características dos Sistemas Técnicos da habitação M1

Sistema Técnico	Função	Fração servida (0 a 1)	EREN kWh/ano	Consumo Energia Final [kWh/ano]	Parcela das necessidades (0 a 1)
Sist. Solar Térmico	AQS	1	1546	1546	0,65

5.3.1.7 Inércia Térmica

Para a determinação da inércia térmica é necessário obter os valores da massa superficial útil dos elementos, o qual é considerada como a massa de todas as camadas de elementos desde a camada de isolamento ou caixa de ar até o interior da habitação, no caso de paredes sem isolamento a massa útil deve ser a metade da massa total. A massa superficial útil não deve superar os 150 kg/m². Também deve ser calculado o fator de redução da massa superficial (τ_i) o qual pode reduzir a massa superficial útil conforme a capacidade que tem os elementos de absorver o calor. Para determinar este valor deve consultar-se a metodologia indicada no ponto 6 do Despacho n.º 15793-K/2013 e o ITE50 para determinar a massa volumica de alguns tipos de materiais. A inércia térmica (I_t) calculada para esta habitação indica uma “inércia térmica forte” $I_t > 400 \text{ kg/m}^2$ com um valor de 424,91 kg/m² o que representa um fator fixo para $\alpha = 4,2 \text{ W/}^\circ\text{C}$ essencial para a determinação do fator de utilização dos ganhos térmicos (η_i).

5.3.1.8 Apresentação de Resultados dos Indicadores Energéticos

Nesta subsecção são apresentados os valores dos indicadores energéticos e do balanço energético da habitação M1 com as suas características o mais adaptadas à realidade. Aqui estão incluídos os valores necessários para a classificação energética da habitação incluído as necessidades nominais anuais de energia de cada estação (N_{ic} e N_{vc}) (Tabelas 22 e 23), a energia útil para preparação de água quente sanitária (Q_a), a energia produzida a partir de fontes renováveis para usos regulados (E_{ren}) e a energia produzida a partir de fontes renováveis para produção de AQS ($E_{ren \text{ AQS}}$). Os três últimos apresentados na Tabela 24.

As necessidades nominais de energia primária do edifício são possíveis de obter após o somatório de todas as necessidades energéticas e descontando as contribuições de energias renováveis afetados

pelos fatores de conversão indicados no Despacho n.º 15793-D/2013 o qual permite que o resultado seja expresso em unidades de energia primária ($\text{kWh}_{\text{EP}}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$). O resultado da classificação energética está apresentado na Tabela 25.

Tabela 22 - Resultados da estação de aquecimento da habitação M1

Indicadores de Desempenho Energético na Estação de Aquecimento					
Edifício Real		Edifício de Referência		Unidades	
Indicador	Resultado	Indicador	Resultado		
Perdas Térmicas	$H_{ext,i}$	252,15	$H_{ext,i_{ref}}$	296,25	[W/°C]
	$H_{enu,i}$	22,36	$H_{enu,i_{ref}}$	24,00	[W/°C]
	$H_{adj,i}$	0,00	$H_{adj,i_{ref}}$	0,00	[W/°C]
	$H_{ecs,i}$	31,74	$H_{ecs,i_{ref}}$	61,24	[W/°C]
	$H_{tr,i}$	306,25	$H_{tr,i_{ref}}$	381,49	[W/°C]
	$Q_{tr,i}$	6409,13	$Q_{tr,i_{ref}}$	7983,63	[kWh/ano]
	$H_{ve,i}$	69,44	$H_{ve,i_{ref}}$	69,44	[W/°C]
	$Q_{ve,i}$	1453,14	$Q_{ve,i_{ref}}$	1453,14	[kWh/ano]
Ganhos Térmicos	$Q_{int,i}$	1246,42	$Q_{int,i_{ref}}$	1246,42	[kWh/ano]
	$Q_{sol,i}$	998,62	$Q_{sol,i_{ref}}$	995,19	[kWh/ano]
	$Q_{g,i}$	2245,04	$Q_{g,i_{ref}}$	2241,61	[kWh/ano]
	η_i	0,9963	$\eta_{i_{ref}}$	0,6000	-
	$Q_{gu,i}$	2236,73	$Q_{gu,i_{ref}}$	1344,97	[kWh/ano]
Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento [kWh/m ² .ano]		Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento [kWh/m ² .ano]			
N_{ic}	43,00	N_{i}	61,85		

Tabela 23 - Resultados da estação de arrefecimento da habitação M1

Indicadores de Desempenho Energético na Estação de Arrefecimento					
Edifício Real		Edifício de Referência		Unidades	
Indicador	Resultado	Indicador	Resultado		
Perdas Térmicas	$H_{ext,v}$	252,15	$H_{ext,v_{ref}}$	296,25	[W/°C]
	$H_{enu,v}$	22,36	$H_{enu,v_{ref}}$	24,00	[W/°C]
	$H_{ecs,v}$	31,74	$H_{ecs,v_{ref}}$	61,24	[W/°C]
	$H_{tr,v}$	306,25	$H_{tr,v_{ref}}$	381,49	[W/°C]
	$Q_{tr,v}$	4497,80	$Q_{tr,v_{ref}}$	N/A	[kWh/ano]
	$H_{ve,v}$	80,07	$H_{ve,v_{ref}}$	N/A	[W/°C]
	$Q_{ve,v}$	1175,95	$Q_{ve,v_{ref}}$	N/A	[kWh/ano]
Ganhos Térmicos	$Q_{int,v}$	1532,28	$q_{int_{ref}}$	4,00	[kWh/ano]
	-	-	$g_{v_{ref}}$	0,43	-
	$Q_{sol,v}$	1851,74	$Isol_{ref}$	325,00	[kWh/ano]
	$Q_{g,v}$	3384,02	$Q_{g,v_{ref}}$	5188,98	[kWh]
	η_v	0,9506	$\eta_{v_{ref}}$	0,8748	-
	$Q_{gu,v}$	3216,85	$Q_{gu,v_{ref}}$	4539,32	[kWh/ano]
Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento [kWh/m ² .ano]		Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento [kWh/m ² .ano]			
N_{vc}	1,28	N_v	4,97		

Tabela 24 - Parcela de balanço energético de AQS e aproveitamento de Eren da habitação M1

Energia útil para preparação de água quente sanitária [kWh/ano]		Energia produzida a partir de fontes renováveis para usos regulados [kWh/ano]	
Q_a	$Q_{a_{ref}}$	E_{ren}	$E_{ren_{ref}}$
2377,29	2377,29	1546	N/A

Tabela 25 - Necessidades nominais de energia primária da habitação M1

N_{tc} [$\text{kWh}_{\text{EP}}/(\text{m}^2\cdot\text{ano})$]	N_t [$\text{kWh}_{\text{EP}}/(\text{m}^2\cdot\text{ano})$]	N_{tc}/N_t	Classe energética
126,08	206,58	0,61	B

5.3.2 Habitação A1

5.3.2.1 Zona Climática

O Concelho do Funchal está localizado segundo a nomenclatura das unidades territoriais para fins estatísticos (NUTS) de nível III na Região Autónoma da Madeira sendo os seus parâmetros climáticos em conformidade ao Despacho n.º 15793-F/2013 os que se podem observar nas Tabelas 26 e 27.

Tabela 26 - Parâmetros da estação de aquecimento da Habitação A1

NUTS III	Altitude de referência Z REF [m]	Altitude do local da habitação Z [m]	Número de graus-dias (GD)	Duração da estação de aquecimento (M) [mês]	Temperatura exterior média do mês mais frio da estação de aquecimento ($\theta_{ext,i}$) [°C]	Zona Climática de Inverno	Energia solar média mensal durante a estação (G _{sul}) [kWh/m ² .mês]
RAM	380	226	587	2,70	15,90	I1	105

Tabela 27 - Parâmetros da estação de arrefecimento da Habitação A1

NUTS III	Z REF [m]	Altitude do local da habitação Z [m]	Duração da estação (Lv) [mês]	Temperatura exterior média ($\theta_{ext,v}$) [°C]	Zona Climática de Verão	Energia solar acumulada durante a estação (Isol) [kWh/m ²]	
						0°	S 90°
RAM	380	226	4 meses	21,1	V2	580	280

5.3.2.2 Informação Geométrica

O levantamento geométrico da habitação como se apresenta nos Figura A 8 e Figura A 9 foi realizado durante a visita ao local e com verificação na ficha técnica disponibilizada pelo promotor do apartamento. Na ficha técnica pode-se constatar diversas informações como os elementos que compõem as envolventes opacas e envidraçadas a orientação da fração autónoma em estudo, entre outras informações indispensáveis. As áreas de compartimentações, volumetria e medidas de pé direito podem ser observadas na Tabela 28, de igual forma a envolvente vertical pode ser consultada na Tabela 29.

Tabela 28 - Resumo das áreas da envolvente horizontal da habitação A1

Divisão	Área (m ²)	Pé Direito (m)	% Área	Volume (m ³)
Cozinha/Lavandaria/Arrumos	13,88	2,58	17,6	35,81
Sala	28,56	2,58	36,3	73,68
Quarto Principal	15,07	2,58	19,1	38,88
I.S. Privativa	3,87	2,58	4,9	9,98
Quarto 2	10,97	2,58	13,9	28,30
I.S. Comum	4,17	2,58	5,3	10,76
Circulação	2,22	2,58	2,8	5,73
TOTAL	78,740	2,580	100,0	203,15

Tabela 29 - Resumo de áreas das envolventes verticais da habitação A1

Elemento	Orientação	PTP (m ²)	Vãos Envidraçados (m ²)	Vãos Opacos (m ²)	Parede Efetiva (m ²)
Envolvente Exterior	Sul	2,58	12,62	-	18,08
Envol. Interior em conta. c/edif. Adja.	-	0,32	-	-	13,23
Envol. Interior em contato c/ENU	-	0,32	-	1,89	6,48

5.3.2.3 Envoltente Exterior

Para identificar as envoltentes com requisitos para a classificação energética é importante observar a Figura 35.



Figura 35 - Envoltentes da habitação A1

A parede em contato diretamente com o exterior (orientada ao sul) é constituída do exterior para o interior segundo a ordem aplicada na Tabela 30.

Tabela 30 - Resumo de características de materiais da parede exterior da habitação A1

Tipo de material	Massa do elemento [kg/m ²]	Espessura (e) [m]	Resistência térmica (R) [m ² ·°C/W]
Reboco tradicional de cimento	18	0,010	0,008
Bloco de betão normal	210	0,150	0,200
Isolamento térmico em lâ de rocha	2	0,060	1,500
Bloco de betão normal	190	0,100	0,160
Reboco tradicional de cimento	18	0,010	0,008

As PTP desta envoltente são unicamente pilares compostos por: Reboco tradicional de cimento ou cal com massa volúmica aparente seca compreendida entre 1800kg/m³ e 2000kg/m³ e espessura de 0,010m com uma resistência térmica de 0,008 m²·°C/W; Betão armado de inertes correntes com massa volúmica aparente seca compreendida entre 2300 kg/m³ e 2400 kg/m³ e espessura de 0,500 m com uma resistência térmica de 0,250 m²·°C/W. Os parâmetros relevantes desta envoltente podem ser consultados na Tabela 31. As PTL exteriores definidas mediante a metodologia EN ISO 10211 são apresentadas na Tabela 32.

Tabela 31 - Parâmetros da envoltente exterior da habitação A1

Tipo de Solução	Áreas por orientação (m ²)	Área Total (m ²)	U Solução (W/m ² ·°C)	U _{Ref} (W/m ² ·°C)
Parede Exterior	S	18,08	0,52	0,70
	18,08			
Ponte Térmica Plana (Pilares)	S	2,58	2,34	0,70
	2,58			

Tabela 32 - Resumo de PTL exteriores da habitação A1

Tipo de ligação entre elementos	Comp. B (m)	Ψ calculado (W/m. $^{\circ}$ C)	Ψ_{Ref} (W/m. $^{\circ}$ C)
Fachada com varanda	7,4	0,55	0,5
Fachada com caixilharia	6,6	0,1	0,2
Fachada com pavimento intermédio	12,9	0,5	0,5

Os vãos envidraçados são compostos por dois modelos com igual tipo de caixilharia e envidraçado com a diferença que um dos modelos não possui proteção exterior. Os vãos envidraçados são constituídos do exterior para o interior da seguinte forma: caixilharia simples de correr de alumínio sem corte térmico e sem quadricula; vidro duplo incolor de 4 a 8 mm + câmara de ar de 10 mm + vidro incolor de 5 mm. Em alguns vãos (Quartos de dormir) existe uma proteção móvel exterior de portadas com réguas metálicas de cor escura e proteção móvel interior de cortinas opacas de cor clara. Os parâmetros dos vãos envidraçados podem ser consultados nas Tabelas 33 e 34.

Tabela 33 - Resumo de parâmetros por V.E. da habitação A1

Divisão	Designação do tipo de solução	Orientação	Área envidraçada (m ²)	Vão Envidraçado à Face Exterior da Parede?	Pala horizontal α°	δ_T	Área do compartimento que serve (m ²)
Quarto Principal	VE1	Sul	2,03	Não	-	0,04	15,07
Quarto 2	VE1	Sul	3,50	Não	45	0,02	10,97
Cozinha/Lavandaria	VE2	Sul	1,50	Não	-	0,33	13,88
Sala	VE2	Sul	5,59	Não	45	0,20	28,56

Tabela 34 - Características dos tipos de V.E. da habitação A1

Designação do Tipo de Solução	U_{wdn} (W/m ² . $^{\circ}$ C)	$g_{\perp,vi}$	$g_{\perp,T}$	FS Prot. Perm. $g_{\perp Tp}$	Classe da Caixilha.	Tipo de Vidro	Fração Envidra. F_g	U_{Ref} (W/m ² . $^{\circ}$ C)	Área (m ²)
VE1	2,40	0,75	0,04	0,75	S/clas.	Duplo	0,70	2,80	5,52
VE2	3,70	0,75	0,37	0,75	S/clas.	Duplo	0,70	2,80	7,09

5.3.2.4 Envoltente Interior

Para a envoltente interior em contato com um ENU (espaço comunitário de caixa de elevadores e escadarias) e para a envoltente interior em contato com o edifício adjacente foi definida um elemento de parede similar composta por uma parede interior constituída por: Reboco tradicional de cimento ou cal com massa volúmica aparente seca compreendida entre 1800kg/m³ e 2000kg/m³ com uma espessura de 0,010 m e resistência térmica de 0,008 m². $^{\circ}$ C/W; Pano simples de alvenaria "bloco de betão normal" com espessura de 0,25 m e resistência térmica de 0,33 m². $^{\circ}$ C/W; Reboco tradicional de cimento ou cal, com massa volúmica aparente seca compreendida entre 1800kg/m³ e 2000kg/m³, espessura de 0,010 m, resistência térmica de 0,008 m². $^{\circ}$ C/W. Considerou-se PTP por pilares com secção de 25x25 cm² constituído da seguinte forma: Reboco tradicional de cimento ou cal, com uma massa volúmica aparente seca compreendida entre 1800kg/m³ e 2000kg/m³ com espessura de 0,010 m e resistência térmica de 0,008 m². $^{\circ}$ C/W; Betão armado de inertes correntes com uma massa volúmica aparente seca compreendida entre 2300kg/m³ e 2400kg/m³ com espessura de 0,250m, resistência térmica de 0,125m². $^{\circ}$ C/W. A envoltente em contato com o ENU possui um vão opaco (porta de acesso a fração

independente) constituído por: Madeira maciça densa, com massa volúmica aparente seca compreendida entre 750kg/m^3 e 870kg/m^3 , espessura de $0,030\text{m}$, resistência térmica de $0,130\text{m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$. Para a determinação do coeficiente de redução de perdas foi utilizada a metodologia indicada no Despacho n.º 15793-K/2013. Os parâmetros térmicos relevantes para este tipo de envolvente podem-se observar na Tabela 35. A PTL da envolvente interior em contato com o ENU foi determinada com a norma EN ISO 10211 e apresenta-se o resultado na Tabela 36.

Tabela 35 - Parâmetros térmicos da envolvente interior da habitação A1

Designação do Tipo de Solução	Espaço não útil (ENU)	Qual a solução corrente adjacente associada?	Área (m^2)	b_{tr}	U Solução ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$)	Área Efectiva (m^2)	U_{Ref} ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$)
Parede interior	Caixa de elevadores		8,69	0,90	0,97	8,69	0,70
Parede interior	Edifício Adjacente		13,55	0,60	0,97	13,55	0,90
Vão Opaco (Porta)	Caixa de elevadores	Parede Interior	1,89	0,90	2,56	1,89	0,70
PTP Pilar	Edifício Adjacente	Parede Interior	0,32	0,60	2,54	0,32	0,90
PTP Pilar	Caixa de elevadores	Parede Interior	0,32	0,90	2,54	0,32	0,70

Tabela 36 - PTL interior do ENU da habitação A1

Espaço não útil	b_{tr}	Tipo de PTL	B (m)	ψ ($\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$)	ψ_{Ref} ($\text{w/m}\cdot^\circ\text{C}$)
Caixa de elevadores	0,9	Fachada com pavimento de nível intermédio	4,10	0,60	0,50

5.3.2.5 Ventilação

A renovação de ar da fração é feita através da infiltração de ar pelos vãos envidraçados reguláveis manualmente, vãos opacos e aberturas fixas na envolvente exterior, a exaustão é possível mediante os mesmos elementos mais os exaustores (equipamentos de baixa perda de carga) instalados nos compartimentos das instalações sanitárias e cozinha. Dito isto a ventilação é considerada do tipo natural (Figura A 10) pelo que se estima mediante os cálculos da folha de cálculo itecons que durante a estação de arrefecimento e aquecimento as renovações de ar são de $0,81\text{ Rph}$ (h^{-1}).

5.3.2.6 Sistemas Técnicos

Esta habitação não possui equipamentos destinados ao acondicionamento do ar interior nem equipamentos que promovam o aproveitamento regulamentar das energias renováveis. Para a preparação das AQS a habitação usufrui de um esquentador (Figura A 11) de marca Vulcano (WRD 11-2 KM) que satisfaz o 100% das necessidades mediante a fonte de energia de gás propano com uma potência de $18,6\text{ kW}$ e uma eficiência consultada na sua etiqueta técnica de $0,85$. De acordo com a folha de cálculo do itecons foi determinado um consumo de energia final anual de $2330,67\text{ kWh/ano}$.

5.3.2.7 Inércia Térmica

Calculada segundo a metodologia definida na Secção 6 do Despacho n.º 15793-K/2013 esta habitação consta de uma inércia térmica forte $It > 400\text{ kg/m}^2$ com um valor de $571,82\text{ kg/m}^2$ o que representa um fator fixo para $\alpha = 4,2\text{ W/}^\circ\text{C}$.

5.3.2.8 Apresentação de Resultados dos Indicadores Energéticos

Nesta subsecção são apresentados os valores necessários para a classificação energética da habitação A1 incluindo as necessidades nominais anuais de energia de cada estação (Nic e Nvc) apresentados nas Tabelas 37 e 38. A energia útil para preparação de água quente sanitária (Qa), a energia produzida a partir de fontes renováveis para usos regulados (Eren) e a energia produzida a partir de fontes renováveis para produção de AQS (Eren AQS) apresentam-se na Tabela 39. O resultado da classificação energética da habitação A1 está apresentado na Tabela 40.

Tabela 37 - Resultados da estação de aquecimento da habitação A1

Indicadores de Desempenho Energético na Estação de Aquecimento					
Edifício Real		Valores de Referência			
Indicador	Resultado	Indicador	Resultado	Unidades	
Perdas Térmicas	$H_{ext,i}$	66,11	$H_{ext,i_{ref}}$	61,25	[W/°C]
	$H_{enu,i}$	14,89	$H_{enu,i_{ref}}$	8,71	[W/°C]
	$H_{adj,i}$	8,38	$H_{adj,i_{ref}}$	7,49	[W/°C]
	$H_{ecs,i}$	-	$H_{ecs,i_{ref}}$	-	[W/°C]
	$H_{tr,i}$	89,38	$H_{tr,i_{ref}}$	77,45	[W/°C]
	$Q_{tr,i}$	1 259,16	$Q_{tr,i_{ref}}$	1091,14	[kWh/ano]
	$H_{ve,i}$	56,21	$H_{ve,i_{ref}}$	41,44	[W/°C]
	$Q_{ve,i}$	791,87	$Q_{ve,i_{ref}}$	583,84	[kWh/ano]
Ganhos Térmicos	$Q_{int,i}$	620,90	$Q_{int,i_{ref}}$	620,90	[kWh/ano]
	$Q_{sol,i}$	1159,23	$Q_{sol,i_{ref}}$	495,75	[kWh/ano]
	$Q_{g,i}$	1780,13	$Q_{g,i_{ref}}$	1116,65	[kWh/ano]
	η_i	0,86	$\eta_{i_{ref}}$	0,6	-
	$Q_{gu,i}$	1531,33	$Q_{gu,i_{ref}}$	669,99	[kWh/ano]
	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento [kWh/m ² .ano]		Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento [kWh/m ² .ano]		
N_{ic}	6,60	N_{i}	12,76		

Tabela 38 - Resultados da estação de arrefecimento da habitação A1

Indicadores de Desempenho Energético na Estação de Arrefecimento					
Edifício Real		Valores de Referência			
Indicador	Resultado	Indicador	Resultado	Unidades	
Perdas Térmicas	$H_{ext,v}$	66,11	$H_{ext,v_{ref}}$	61,25	[W/°C]
	$H_{enu,v}$	14,89	$H_{enu,v_{ref}}$	8,71	[W/°C]
	$H_{ecs,v}$	-	$H_{ecs,v_{ref}}$	-	[W/°C]
	$H_{tr,v}$	81,00	$H_{tr,v_{ref}}$	69,96	[W/°C]
	$Q_{tr,v}$	919,27	$Q_{tr,v_{ref}}$	N/A	[kWh/ano]
	$H_{ve,v}$	56,21	$H_{ve,v_{ref}}$	N/A	[W/°C]
	$Q_{ve,v}$	637,91	$Q_{ve,v_{ref}}$	N/A	[kWh/ano]
Ganhos Térmicos	$Q_{int,v}$	922,20	$q_{int_{ref}}$	4,00	[kWh/ano]
	-	-	$g_{v_{ref}}$	0,43	-
	$Q_{sol,v}$	623,59	$Isol_{ref}$	325	[kWh/ano]
	$Q_{g,v}$	1545,80	$Q_{g,v_{ref}}$	3122,99	[kWh]
	η_v	0,8106	$\eta_{v_{ref}}$	0,8180	-
	$Q_{gu,v}$	1253,09	$Q_{gu,v_{ref}}$	2554,78	[kWh/ano]
Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento [kWh/m ² .ano]		Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento [kWh/m ² .ano]			
N_{vc}	3,72	N_v	7,22		

Tabela 39 - Parcela de balanço energético de AQS e aproveitamento de Eren da habitação A1

Energia útil para preparação de água quente sanitária [kWh/ano]		Energia produzida a partir de fontes renováveis para usos regulados [kWh/ano]	
Qa	Qa_{ref}	$Eren$	$Eren_{ref}$
1782,96	1782,96	N/T	N/A

Tabela 40 - Resultado final das necessidades nominais de energia primária da habitação A1

Ntc [kWh _{EP} /(m ² .ano)]	Nt [kWh _{EP} /(m ² .ano)]	Ntc/Nt	Classe energética
49,20	63,36	0,78	B-

5.4 INDICAÇÕES FINAIS

Após terem-se efetuado os cálculos do balanço energético das habitações em estudo utilizando as duas folhas de cálculo referidas ao início do capítulo, decidiu-se trabalhar no capítulo seguinte com a folha da itecons devido à vasta apresentação de resultados que esta folha permite consultar e por ser menos automatizada que a folha da PTnZEB. Assim, torna-se mais prático calcular um resultado de forma manual para ter domínio de todos os parâmetros associados ao valor final. Com isto não se pretende desvalorizar a folha PTnZEB, pelo contrário esta conta com bibliotecas de materiais e efetua cálculos de desconto de vãos das áreas de uma envolvente o que facilita o trabalho de introdução de dados mais eficiente e com menor probabilidade de cometer erros.

Embora as habitações estudadas apresentem características estruturais e arquitetónicas diferentes o que impede uma comparação entre ambas, é importante mencionar que há habitação M1 supera abertamente no que refere a ganhos e perdas térmicas o que era espetável para uma moradia isolada em todas as suas fachadas, mesmo assim dita moradia apresenta uma classificação energética mais eficiente que a habitação A1. Isto acontece devido ao sistema de energias renováveis que possui o qual é responsável de satisfazer uma boa parte da necessidade de energia necessária para a preparação de AQS.

Para ambas habitações os indicadores de desempenho energético apresentam valores inferiores aos de referência com uma exceção na habitação A1 que ostenta perdas de calor por ventilação na estação de aquecimento superiores aos valores de referência. Estas perdas elevadas consideram-se sejam motivadas pela altura da fração e os equipamentos que esta habitação possui para a exaustão do ar, conclui-se esta situação acontece por que a fração envidraçada de esta habitação (16,03%) com base a área útil do pavimento é inferior a da habitação M1 (23,47%) e a velocidade do vento aplicada para a localidade da habitação A1 e inferior a da aplicada para habitação M1 da mesma forma a rugosidade do terreno é menor para a habitação M1.

Percentualmente a habitação M1 apresenta uma área útil de pavimento de quase 40% a mais do que a habitação A1, mas apresenta uma perda térmica superior a 73% na estação de aquecimento e ganhos térmicos acima de 54% na estação de arrefecimento em comparação com a habitação A1. Isto motivado a que a habitação A1 não possui envolventes opacas de cobertura expostas com o exterior nem pavimentos em contato com o solo o com espaços não uteis, pelo que o SCE não considera alguns dos elementos da habitação A1 importantes para determinar o balanço energético.

Capítulo 6

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO SCE

Seguidamente de conhecer a classe energética das habitações definidas no capítulo anterior passa-se a este capítulo onde se pretende avaliar as incertezas por meio de simulações adotando os parâmetros antes determinado como valores médios. A intensão deste processo é observar a evolução das necessidades energéticas, a sensibilidade de influenciar o resultado final de cada parâmetro e a robustez do método em adotar uma classe energética fase as incertezas.

6.1 INTRODUÇÃO

Para iniciar este capítulo torna-se importante esclarecer, que os indicadores de desempenho mais relevantes de uma habitação durante a estação de aquecimento são aqueles referentes às transferências de energia térmica do interior para o exterior também conhecidos como “Perdas de Calor”, perdas que se originam por elementos da envolvente e pela ventilação. Por outro lado, na estação de arrefecimento os indicadores de desempenho mais significativos são os referentes aos ganhos térmicos para os que se considera os ganhos produzidos pelo interior (atividades da ocupação) e pelos ganhos solares de toda a envolvente. Dito isto apresenta-se de forma gráfica (Figuras 36 e 37) para cada um dos casos de estudo os indicadores de desempenho de forma a conhecer a parcela mais relevante para cada estação.

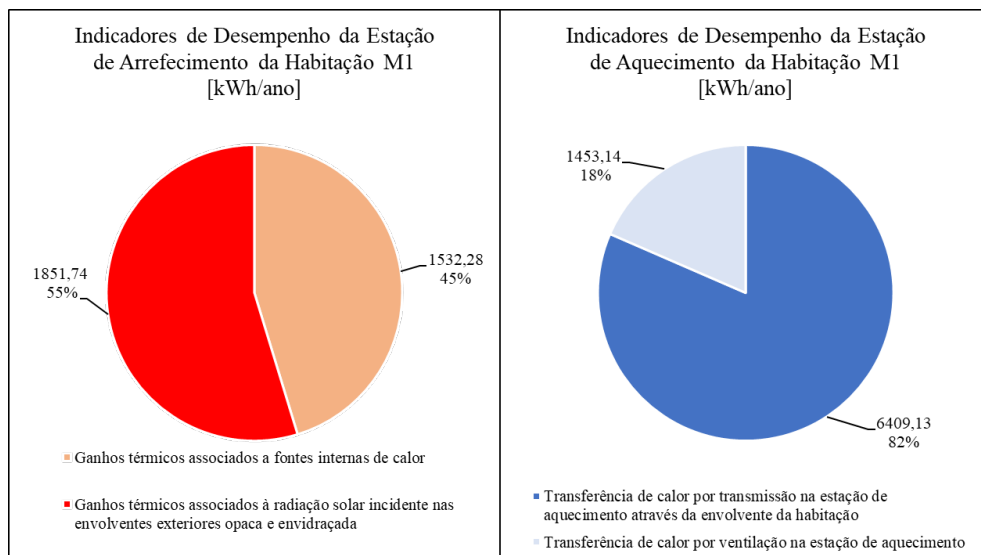


Figura 36 - Indicadores relevantes por estação da Habitação M1

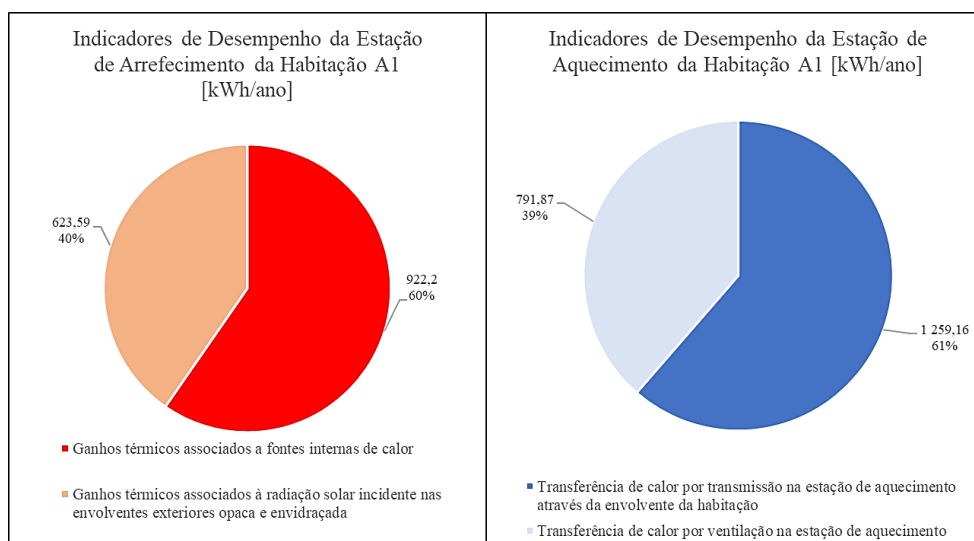


Figura 37 - Indicadores relevantes por estação da Habitação A1

Analisando a grosso modo os indicadores pode-se observar que nas transferências de calor durante a estação de aquecimento a perda de energia térmica mais relevante é a que se desenvolve através das envolventes da habitação, destacando a habitação A1 que só possui uma única fachada em contato direto com o exterior e mesmo assim as perdas pelas envolventes são superiores. Esta pequena observação revela que poderá ser interessante analisar estatisticamente parâmetros como os coeficientes de transmissão térmica (U) de todas as envolventes, e em relação à envolvente envidraçada poderia ser significativo analisar parâmetros como os fatores solares dos vidros e os fatores de obstrução. Embora o antes mencionado, também pretende-se analisar os efeitos das localizações geográficas, a renovação de ar e os sistemas técnicos. Durante a estação de arrefecimento o indicador de ganhos térmicos internos representa uma constante na regulamentação (REH) a qual depende das áreas úteis da habitação multiplicadas por um valor de 4 W/m^2 e pela média da duração da estação, isto indica que as variações paramétricas a ser estudadas são aquelas que definem os ganhos solares pelo que o parâmetro do fator de obstrução da superfície dos elementos ($F_{s,v}$) (geralmente envidraçados) deve ser considerado.

6.2 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Para esta análise os parâmetros foram sujeitos a variações percentuais idênticas tanto positivas como negativas com a intenção de avaliar o desenvolvimento das necessidades energéticas e a classificação energética.

6.2.1 Análise ao coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca

Com a intenção de apresentar um valor global do coeficiente de transmissão térmica (U) da envolvente opaca, decidiu-se adotar um valor médio ponderado pela área dos elementos estudados para classificação energética sendo estes apresentados nas Tabelas 41 e 42.

Tabela 41 - Valor médio do coeficiente U opaco da habitação M1

		Elemento	U [W/(m ² .°C)]	Área [m ²]	U média ponderada [W/(m ² . °C)]
Envolvente Exterior		Parede	0,33	102,68	0,34
		PTP Pilares	0,50	7,15	
		PTP Vigas	0,50	13,06	
		Cobertura	0,30	157,3	
		Vão Opaco	2,97	2,97	
		Pavimento ECS	0,26	122,48	
Envolvente Interior		Parede	0,32	16,14	
		Vão Opaco	2,75	1,64	
		PTP Pilares	0,50	0,55	
		PTP Vigas	0,50	1,48	
		Pavimento ENU	0,40	9,67	

Tabela 42 - Valor médio do coeficiente U opaco da habitação A1

		Elemento	U [W/(m ² . °C)]	Área [m ²]	U média ponderada [W/(m ² . °C)]
Envolvente Exterior		Parede	0,52	18,08	0,96
		PTP Pilares	2,34	2,58	
Envolvente Interior		Parede	0,97	22,24	
		Vão Opaco	2,56	1,89	
		PTP Pilares	2,54	0,64	

Para analisar parametricamente a influência do coeficiente de transmissão térmica sobre as necessidades energéticas a causa de diferentes tipos de isolamentos e outros materiais que compõe as camadas de um elemento da envolvente, apresenta-se as seguintes variações que podem observar-se no eixo horizontal das Figura 38 e Figura 39 onde também manifesta-se o desenvolvimento das necessidades energéticas e o balanço energético (R_{Nt}).

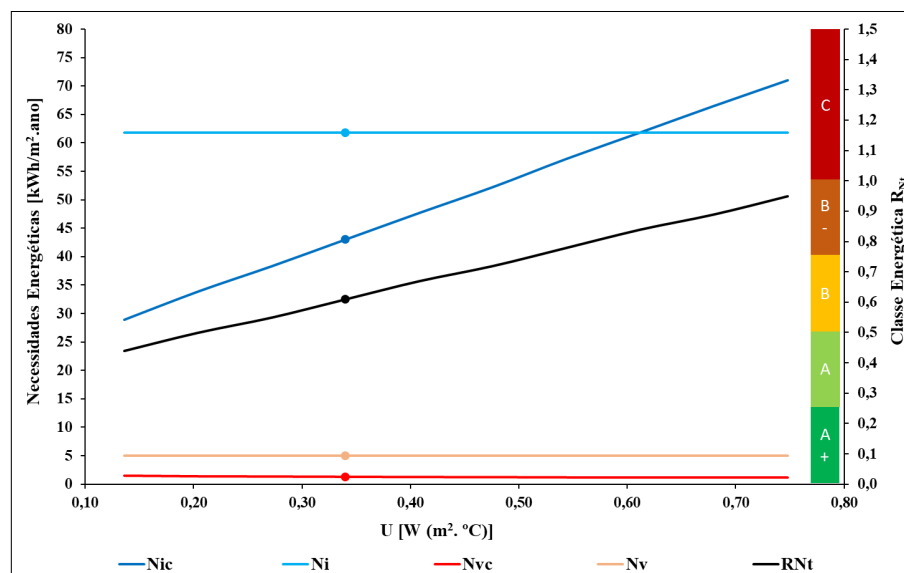


Figura 38 – Desenvolvimentos após variação do coeficiente U das EO na habitação M1

Na Figura 38 observa-se um comportamento linear crescente das necessidades reais de aquecimento enquanto os elementos da envolvente tornam-se menos eficientes, o mesmo ocorre no balanço energético que com uma queda de menos de 80% a habitação obtém uma classe energética menos eficiente.

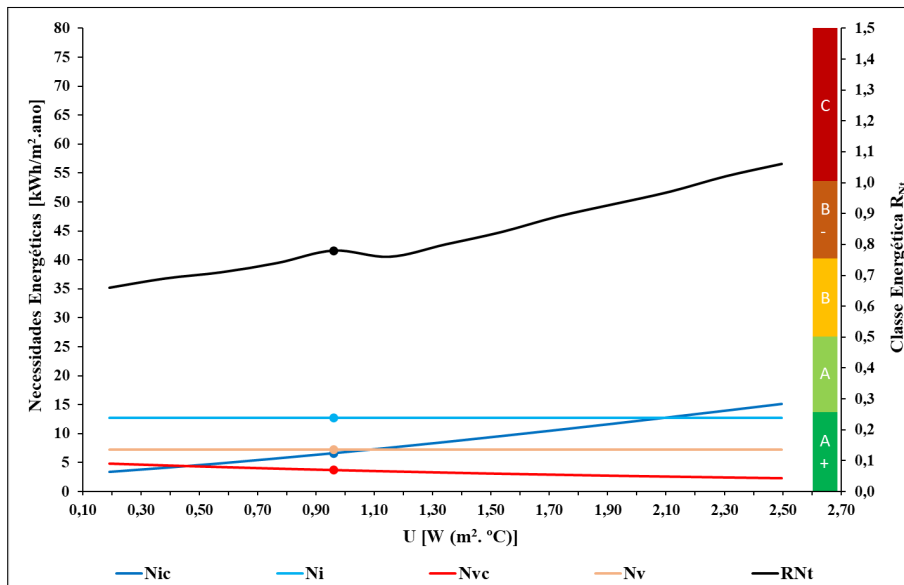


Figura 39 – Desenvolvimentos após variação do coeficiente U das EO na habitação A1

No caso da habitação A1 manifesta-se um desenvolvimento linear crescente do mesmo modo que a habitação M1, mas nesta última com uma ligeira queda no valor R_{Nt} para um aumento do coeficiente U de 20% devido a esta habitação só ter uma fachada exposta diretamente ao exterior onde os ganhos solares não balancaram as transferências e isto ocorre de forma linear crescente para aumentos de U superiores onde as condições da envolvente são ainda menos eficientes.

Em termos da metodologia de cálculo do REH o que acontece é que quando as N_{vc} são muito baixas e a habitação entra numa zona de “risco mínimo de sobreaquecimento” a regulamentação anula ($\delta=0$) a parcela de energia primária para arrefecimento no cálculo do N_{tc} (Figura 40).

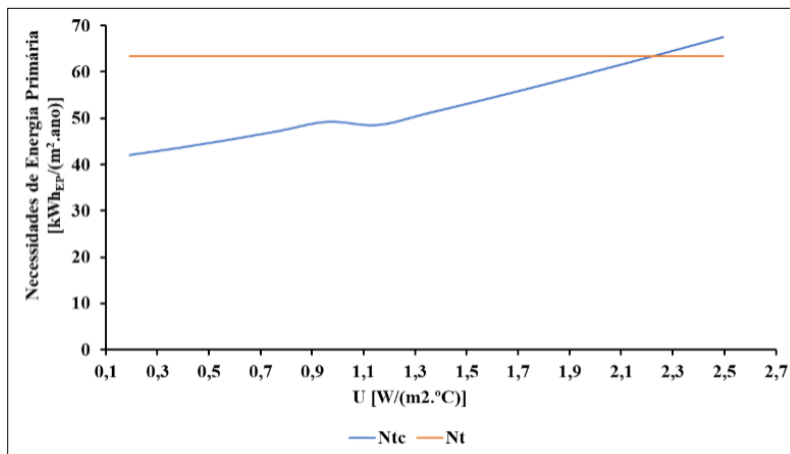


Figura 40 - Energia primaria por variação de U na habitação A1

6.2.2 Análise ao coeficiente de transmissão térmica da envolvente envidraçada

De igual forma que na envolvente opaca determinou-se o valor médio do coeficiente U das envolventes envidraçadas com influência das áreas dos vãos envidraçados sendo apresentados os valores nas Tabelas 43 e 44.

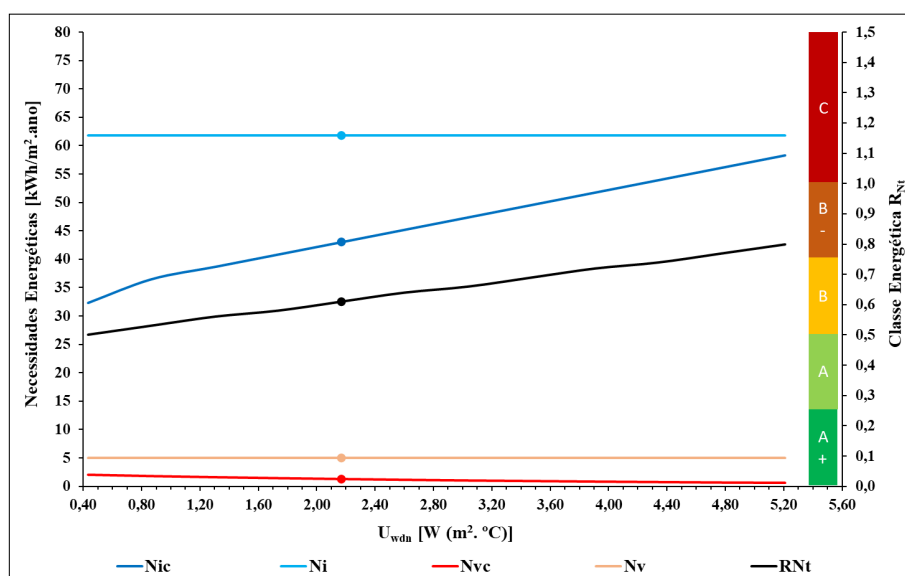
Tabela 43 - Valor médio do coeficiente U dos VE da habitação M1

Elemento	U_{wdn} [W/(m ² . °C)]	Área [m ²]	U_{wdn} média ponderada [W/(m ² . °C)]
VE1	2,20	28,6	2,17
VE2	2,70	2,1	

Tabela 44 - Valor médio do coeficiente U dos VE da habitação A1

Elemento	U_{wdn} [W/(m ² . °C)]	Área m ²	U_{wdn} média ponderada [W/(m ² . °C)]
VE1	2,40	5,52	3,13
VE2	3,70	7,09	

As variações adotadas para a avaliação paramétrica da influência do coeficiente térmico dos vãos envidraçados sobre as necessidades energéticas e a classificação energética das habitações em estudo são apresentadas no eixo horizontal das Figuras 41 e 42.

**Figura 41 – Desenvolvimentos após variação do coeficiente U dos VE na habitação M1**

Da mesma forma que na envolvente opaca o aumento do coeficiente U dos vãos envidraçado gera um aumento crescente das necessidades de aquecimento e uma classe energética menos eficiente se o coeficiente U for aumentado em mais de 100%.

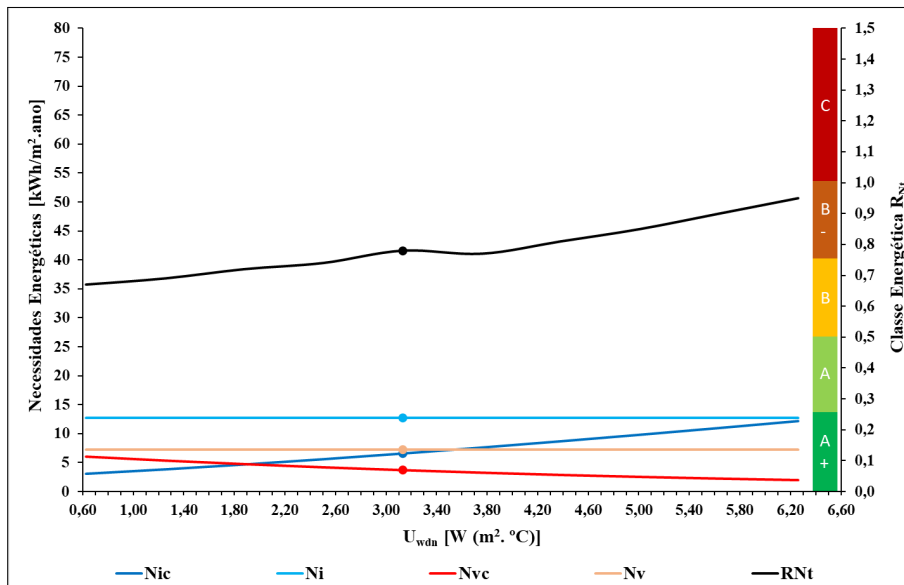


Figura 42 – Desenvolvimentos após variação do coeficiente U dos VE na habitação A1

6.2.3 Análise das renovações de ar Rph (h⁻¹)

Os valores adotados para a variação nas renovações de ar nas habitações em estudo podem ser observados no eixo horizontal das Figuras 43 e 44.

Como pode-se observar nos gráficos existe um desenvolvimento crescente nas necessidades de aquecimento e uma perda de eficiência da classe energética significativa com um aumento do Rph em pelo menos 90%. No que refere às necessidades de arrefecimento são logicamente menores em espaços com maior ventilação embora o seu decréscimo seja mínimo comparado com o aumento que desenvolve as Nic.

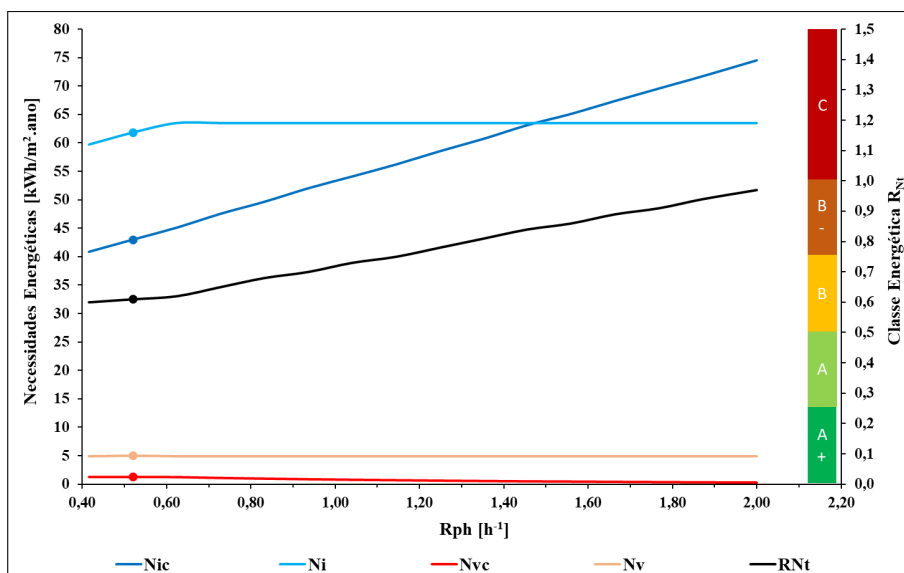


Figura 43 - Variações das renovações de ar na habitação M1

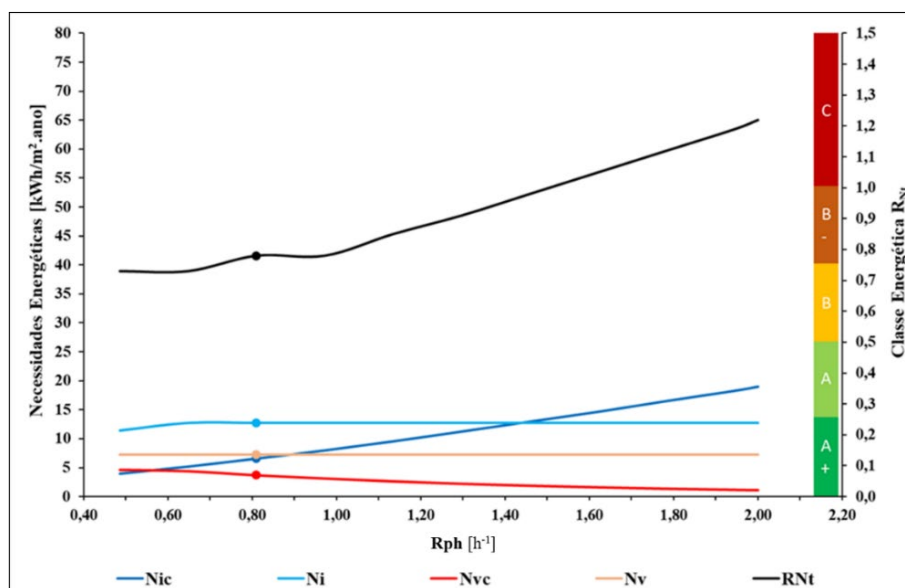


Figura 44 - Variações das renovações de ar na habitação A1

6.2.4 Análise da Altitude e Localização Geográfica

A Região Autónoma da Madeira pertence unicamente a uma localização para todos os seus municípios segundo a nomenclatura das unidades territoriais para fins estatísticos (NUTS) de nível III. Dito isto a forma mais conveniente de simular as zonas climáticas de inverno e verão na RAM é efetuando variações na altitude dos casos de estudo, isto demonstra-se na comparação de mudança de concelho no território da RAM nas Figuras 47 e 48 onde mesmo simulando diferentes concelhos os valores são iguais se as altitudes forem as mesmas. As habitações na RAM estão localizadas aproximadamente até uma cota máxima de 800 m o que permite obter uma zona climática I2-V1, para obter uma zona I3-V1 a habitação deveria estar num local de pelo menos 1040 m de altitude o que não acontece com edifícios de habitação na RAM.

As alterações de altitude do local das habitações de estudo embora mudem as zonas climáticas também mudam os valores das necessidades energéticas como se apresenta nas Figuras 45 e 46.

Como se pode observar o aumento da altitude gera modificações até nos valores de referência devido às mudanças das zonas climáticas, aumentando consideravelmente as necessidades de aquecimento com o aumento da altitude, a queda no valor da classe energética que ocorre em ambos casos numa altitude superior a 700 m ocorre devido a que as condições do edifício de referência se adaptam a uma zona climática I2-V1 onde a temperatura média exterior e a energia solar acumulada são inferiores. A alteração da altitude resulta menos relevante que as de U e Rph pois as mudanças nas classes energéticas quase não ocorrem a menos que a habitação esteja próxima da mudança de zona climática.

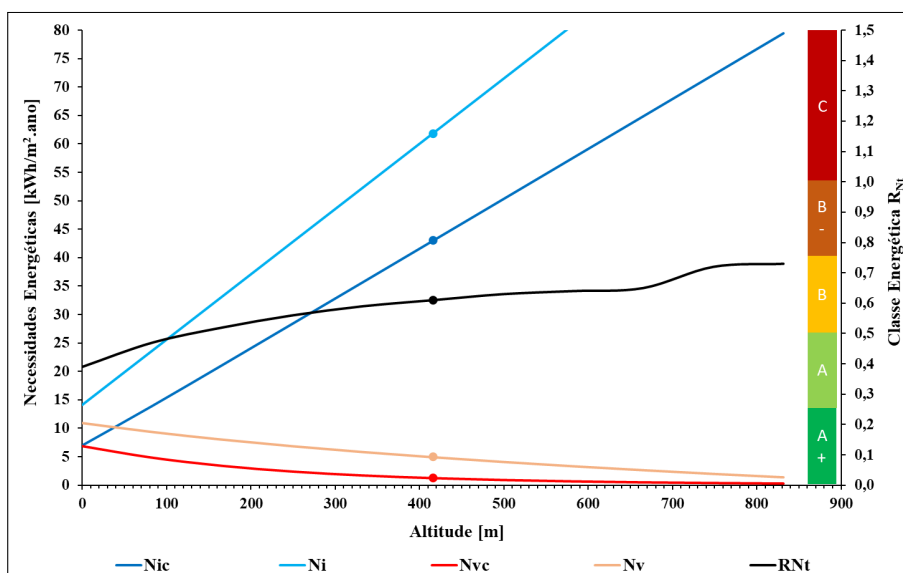


Figura 45 - Variações da altitude do local na habitação M1

Para a mudança da localização geográfica das habitações foram eleitas cidades dentro do território nacional sendo quatro cidades no território continental (Porto, Coimbra, Lisboa e Faro) duas cidades na Região Autónoma da Madeira (Funchal e São Vicente) e uma na Região Autónoma dos Açores (Ponta Delgada). Para apresentar as alterações energéticas, é necessário observar as Figuras 47 e 48.

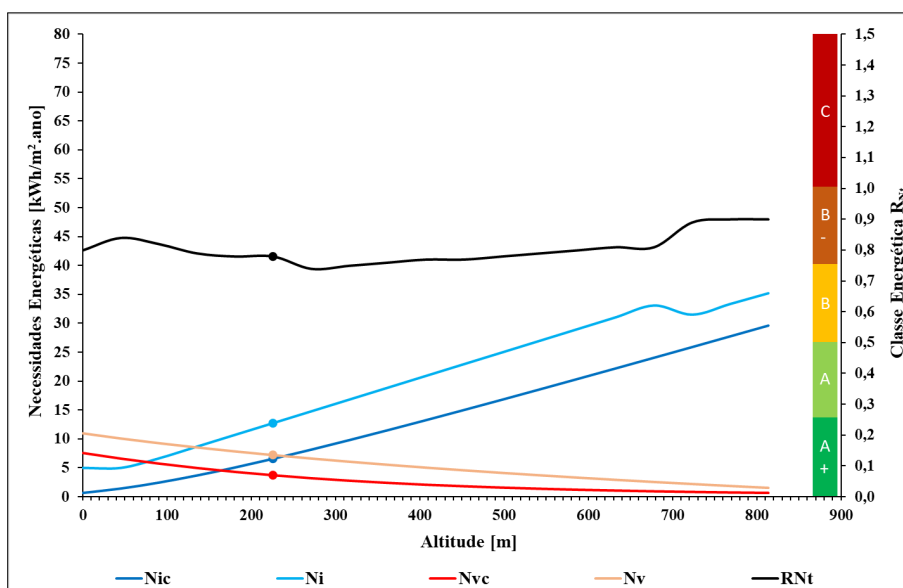


Figura 46 - Variações da altitude do local na habitação A1

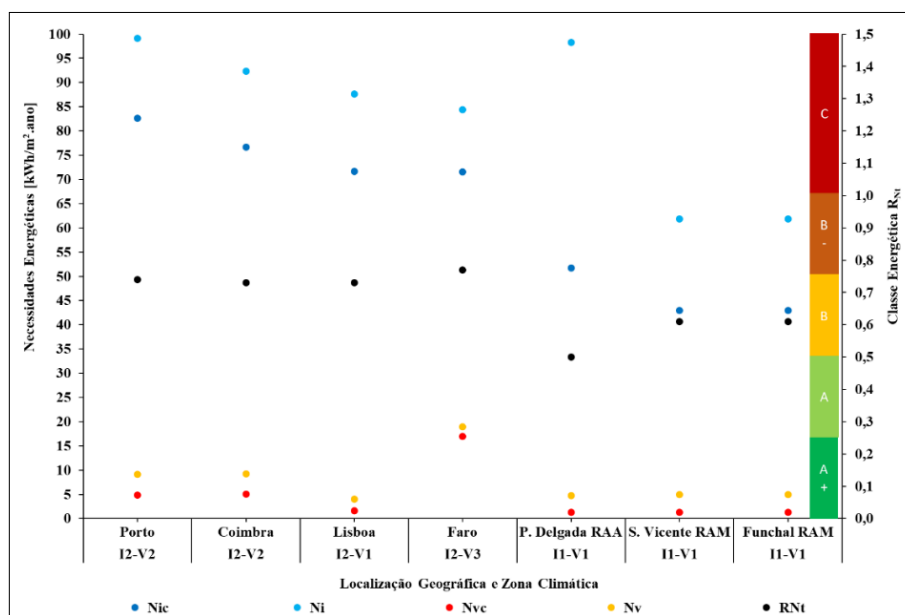


Figura 47 - Variações da Localização Geográfica da Habitação M1

Em condições geométricas de habitações com quatro fachadas expostas ao exterior as habitações com iguais zonas climáticas localizadas no continente não apresentam quase nenhuma alteração na classe energética o mesmo acontece na RAM. Mas comparando a localização da RAA com a RAM observa-se que a RAA tem um clima mais fresco na estação de aquecimento o que permite um balanço energético melhor para a solução construtiva adotada na habitação M1 o que se traduz numa classe energética mais eficiente.

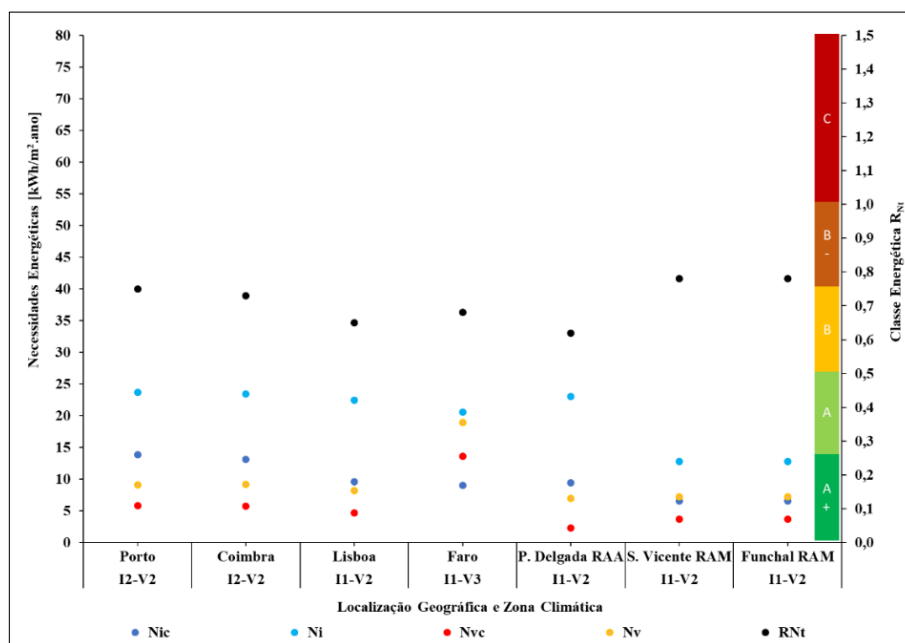


Figura 48 - Variações da Localização Geográfica da Habitação A1

Cada zona climática é caracterizada de forma estatística segundo a ocorrência e persistência de fenómenos climáticos, e estas são determinadas com valores de referência (valores médios, variâncias e extremos) o que significa que em zonas climáticas iguais também podem existir diferenças como é o

caso da Região Autónoma dos Açores e a da Madeira que possuem um mesmo tipo de zona climática (NUTS III), mas as necessidades de arrefecimento são menores nos Açores que na Madeira.

6.2.5 Análise dos Sistemas Técnicos

Os sistemas técnicos representam uma parcela muito relevante no balanço energético final das habitações. Em Portugal nem todas as habitações possuem equipamentos para o aquecimento ou arrefecimento do ar, mas sim na maioria dos casos para a preparação de águas quentes sanitárias. Dito isto, nesta secção pretende-se avaliar o resultado da classificação energética mediante a variação de sistemas de preparação de AQS e aquecimento do ar. Na regulamentação atual em todas as habitações é imposta a instalação de equipamentos de preparação de AQS que promovam a utilização de energias renováveis em especial a energia solar quando o local tem exposição solar adequada, mas estes equipamentos podem não ser suficientes para suprir estas necessidades durante todo o ano, pelo que as habitações devem ter equipamentos auxiliares que na maior parte das vezes utilizam fontes de energias padrão (eletricidade e gás). Nos casos de habitações mais antigas regulamentadas com normativas antecedentes, os equipamentos chamados anteriormente de auxiliares são os principais ou únicos em existência.

Mencionado o anterior as variações dos equipamentos serão executadas mediante a aplicação de sistemas com fontes de energia padrão, mistas e “100% renováveis”. Estes equipamentos podem ser observados na Tabela 45 onde encontram-se organizados em sistemas de maior a menor impacto em consumo de energia primária. No caso da habitação M1 esta já possui um sistema de coletor solar térmico e os valores do balanço energético são os identificados no edifício real.

Tabela 45 - Sistemas técnicos adotados para variações de AQS

Variações	Sistema técnico	Fonte de energia	Eficiência
Sistema 1	Termoacumulador elétrico	Eletricidade	0,91
Sistema 2	Esquentador a gás	Gás Propano	0,85
Sistema 3	Bomba de calor	Eletricidade + Ar	2,80
Sistema 4	Caldeira combustível sólido	Biomassa	0,89
Sistema 5	Sistema de coletor solar térmico	Solar	-

As variações de sistemas técnicos manifestam alterações importantes no resultado da classificação energética como pode-se apreciar nas Figuras 49 e 50.

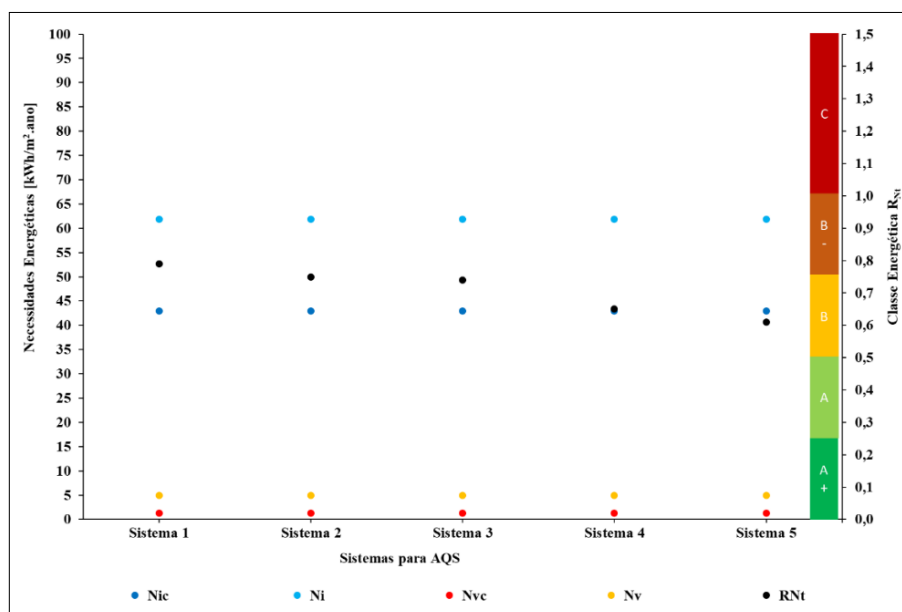


Figura 49 - Alteração de sistemas técnicos de AQS na habitação M1

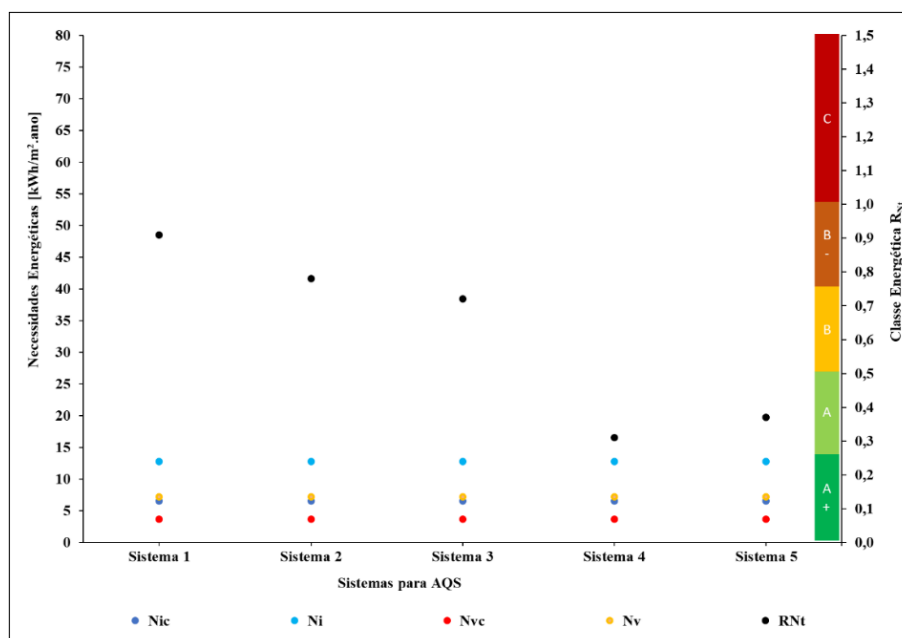


Figura 50 - Alteração de sistemas técnicos de AQS na habitação A1

Para o aquecimento do ar interior são adotados os equipamentos expostos na Tabela 46 organizados também pelo seu consumo de energias primárias.

Tabela 46 - Sistemas técnicos adotados para variações de aquecimento de ar interior

Variações	Sistema técnico	Fonte de energia	Eficiência
Sistema 1	Resistência Elétrica	Eletricidade	1,00
Sistema 2	Multi-Split - ar	Eletricidade	4,00
Sistema 3	Caldeira a Gasóleo	Gasóleo	0,89
Sistema 4	Caldeira a Gás Natural	Gás	0,90
Sistema 5	Bomba de calor	Eletricidade + Ar	4,10
Sistema 6	Caldeira combustível sólido	Biomassa	0,89

É importante destacar que as habitações não possuem atualmente nenhum equipamento para o acondicionamento do ar interior. As variações dos sistemas para o aquecimento do ar são aplicadas

assumindo a existência de uma única unidade de cada um dos equipamentos e por sua vez com uma fração serviço de 100% a totalidade das habitações. O desenvolvimento das necessidades energéticas e balanço energético influenciados pelas variações de sistemas podem ser observadas nas Figuras 51 e 52.

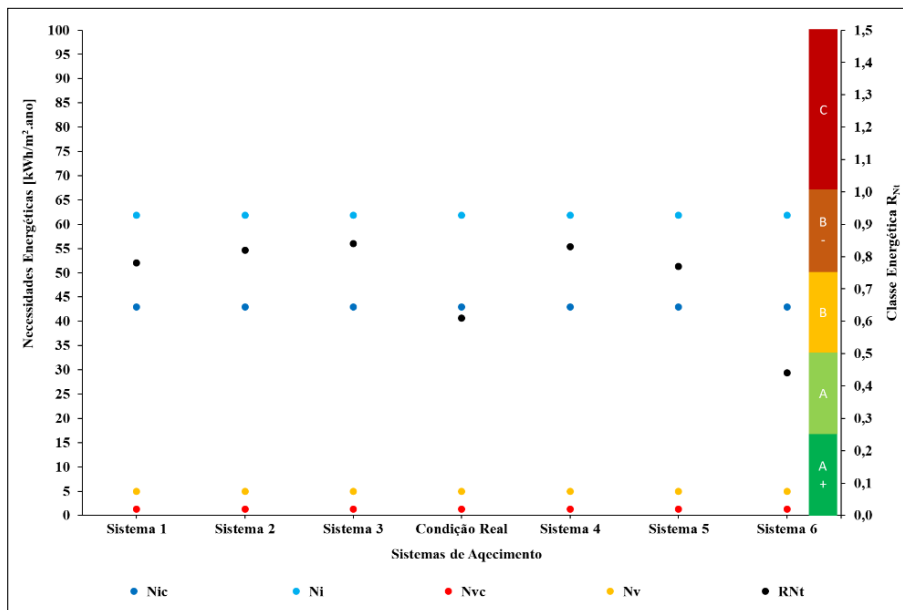


Figura 51 - Alteração de sistemas técnicos de aquecimento de ar na habitação M1

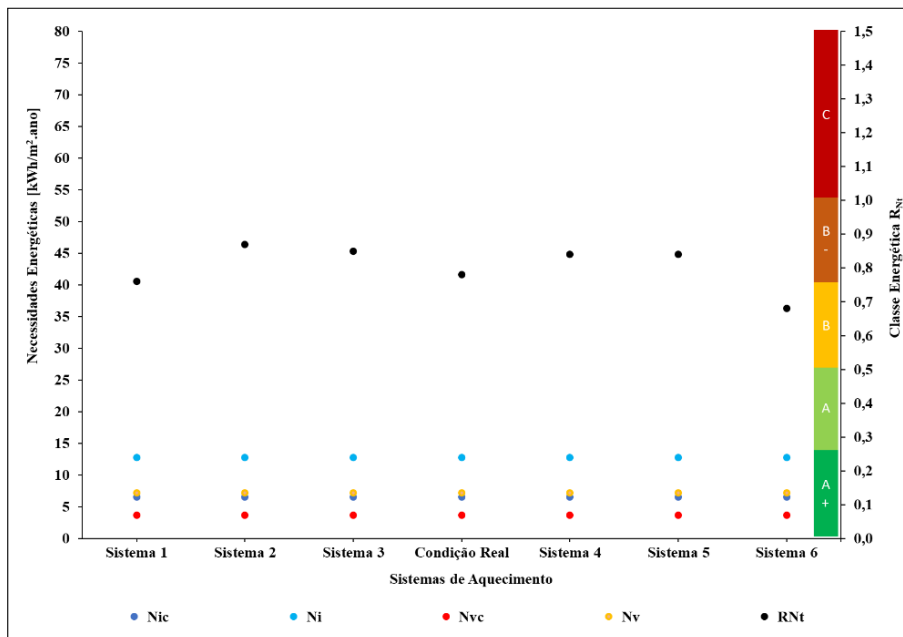


Figura 52- Alteração de sistemas técnicos de aquecimento de ar na habitação A1

Em ambos tipos de sistemas técnico pode-se observar que as necessidades energéticas não são alteradas por que os equipamentos estão diretamente ligados ao consumo de energia primária a utilização de energias renováveis. Aqui logicamente os sistemas com energias renováveis fornecem uma classe energética mais eficiente pela razão de evitar o consumo de energia primária.

É importante ressaltar que a utilização de sistemas que produzem energia a partir de fontes renováveis para satisfazer em conjunto as necessidades de aquecimento do ar e AQS transformam segundo a regulamentação numa habitação com necessidades nulas de energia primária. Dito isto, outros

fatores poderiam ser pouco significativos na classe energética desde que a eficiência dos equipamentos seja elevada. Por exemplo: um equipamento como uma caldeira de combustível sólido considerada como sistema renovável poderia oferecer a uma habitação uma classe energética muito eficiente mesmo se dita habitação possuíse elementos da envolvente com resistências térmicas fracas o que se transformaria em elevadas perdas de calor, isto sem estimar também o impacto ambiental que ocorre na obtenção dos combustíveis sólidos (derivados da madeira).

6.2.6 Análise do Fator de Sombreamento por Elementos no Horizonte (F_h) da Edificação

Trata-se do fator que considera os elementos exteriores adjacentes ao edifício o qual varia segundo o seu ângulo, orientação e condições climáticas do local. Este fator pode produzir alterações consideráveis nas necessidades de aquecimento de uma habitação. Segundo o REH este fator deve ser calculado seguindo as indicações da Tabela 15 Despacho nº 15793-K/2013 o qual obriga o cálculo para todos os vãos envidraçados por separado e desprezando este fator na estação de arrefecimento e em todas as fachadas com orientação ao norte em todas as estações.

As análises que se pretende efetuar aplicarão um fator F_h no mesmo ângulo afetando os vãos envidraçados de todas as fachadas possíveis ao mesmo tempo. O desenvolvimento nas necessidades e balanço energético influenciados pelo F_h podem ser visualizados nas Figuras 53 e 54. É importante ressaltar que as duas habitações não possuem obstáculos no horizonte ou o que é igual a um F_h de 0° .

Como pode-se observar nas Figuras 53 e 54 as variações afetam de forma direta as necessidades de aquecimento como era esperado.

Para o caso da habitação A1 que somente possui vãos envidraçados com orientação ao sul o balanço energético quase indica uma mudança a uma classe energética menos eficiente com obstáculos de ângulo de 45° . Embora considerou-se que os obstáculos afetam todas as envolventes o que é pouco provável, a habitação A1 que só tem uma fachada com ligação ao exterior, apresentou uma mudança mais significativa ao nível da qualificação energética o que indica que o fator F_h pode ter uma influência importante no resultado final de alguns tipos de habitações com fachadas em contato com edifícios adjacentes ou o que é igual a menos fachadas expostas ao exterior.

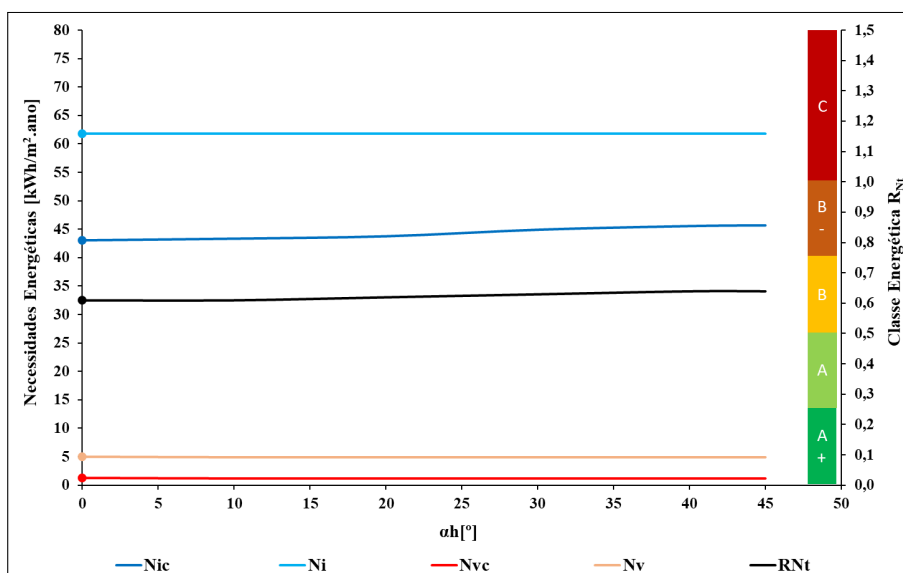


Figura 53 - Variações do fator F_h da Habitação M1

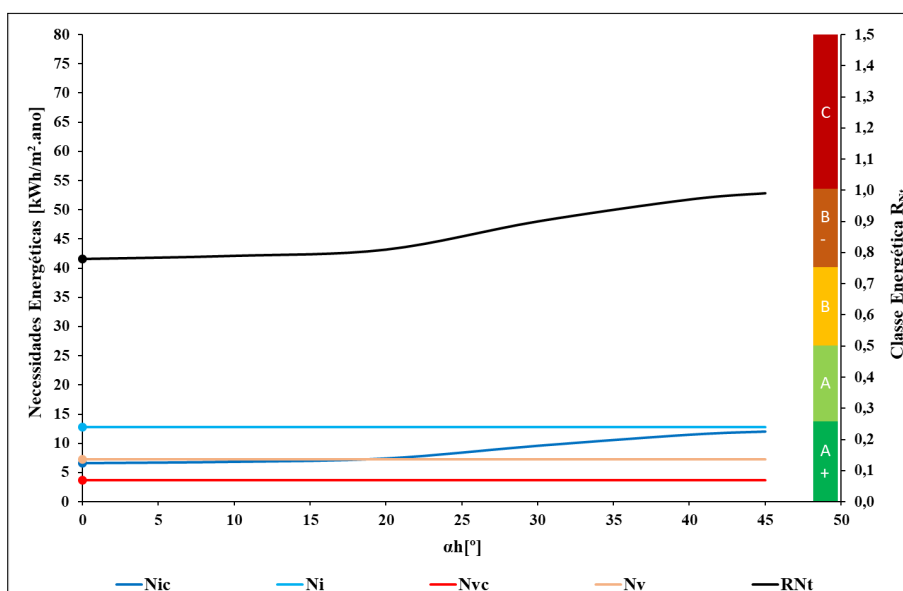


Figura 54 - Variações do fator F_h da Habitação A1

6.2.7 Análise da Orientação das Habitações

A orientação de uma habitação pode ser um fator importante sobre as necessidades energéticas e isto pode depender das dimensões das fachadas envolventes, fator climático do local e resistência térmica dos elementos o que influencia nos ganhos solares. Assim, pretende-se conhecer a influencia no balanço energético e nas necessidades energéticas (Figura 55 e Figura 56) da rotação de 45° em 45° de toda a envolvente exterior. A habitação M1 possui uma configuração real da orientação nos pontos colaterais (NW, SW, NE e SE) e a habitação A1 nos pontos cardinais (N, S, E e W).

Como pode-se observar nas Figuras 55 e 56 a habitação M1 não manifesta grandes alterações por que, além de, que as fachadas tem áreas similares estas estão expostas diretamente ao exterior pelo que os ganhos solares vão ser sempre semelhantes.

Já a habitação A1 que somente possui uma fachada exterior onde se recebem todos os ganhos solares apresentará maiores gastos para satisfazer as condições de aquecimento e por consequência

obtem uma classe menos eficiente. Isto ocorre porque a sua única fachada exterior adotou uma orientação com menor incidência solar.

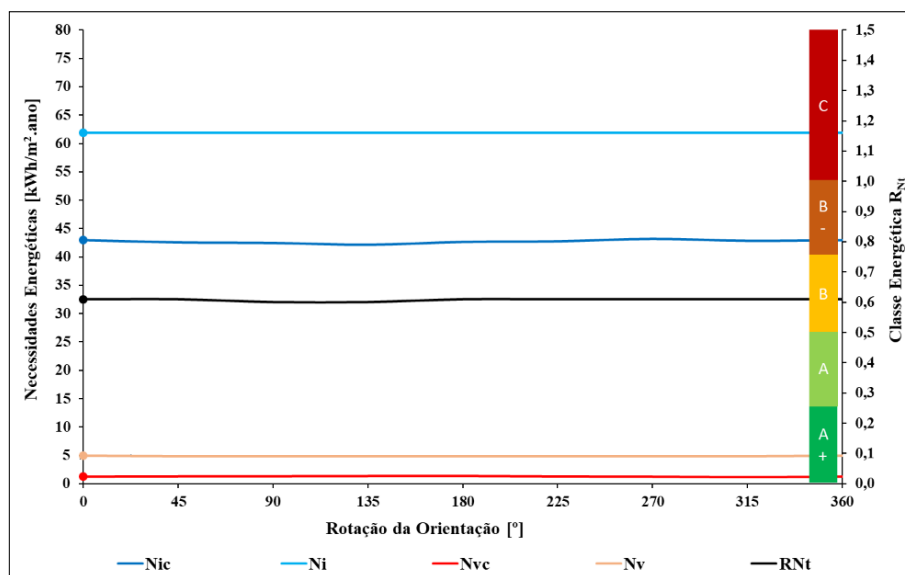


Figura 55 - Variações de rotação da orientação da Habitação M1

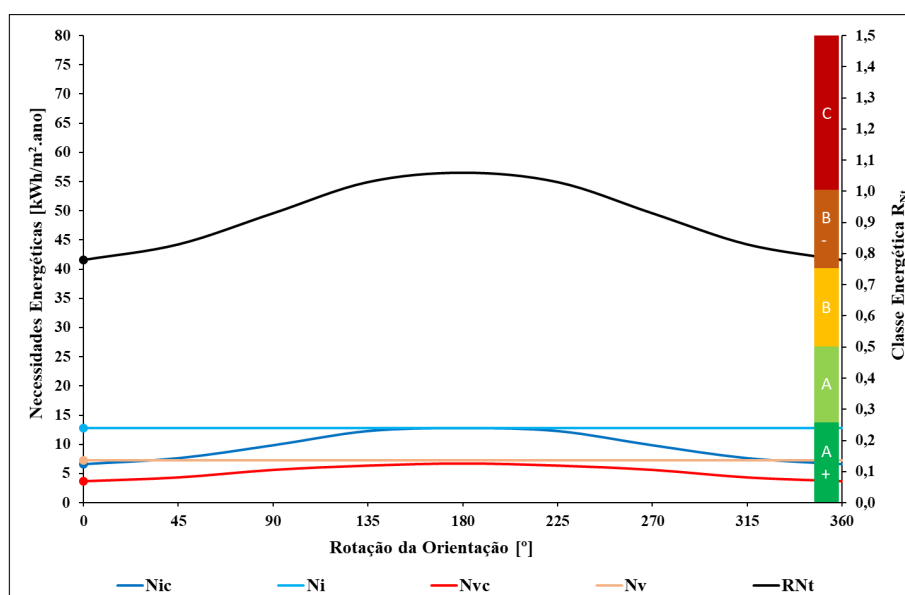


Figura 56 - Variações de rotação da orientação da Habitação A1

6.2.8 Análise na Variação de Áreas interior útil de pavimento (A_p)

Para verificar a influência das áreas sobre as necessidades energéticas e classificação energética foi necessário aumentar ou diminuir proporcionalmente todas as áreas medidas em planta, mas também de forma proporcional as áreas verticais sem alterar o pé direito das habitações o que representa só alterar o comprimento das paredes. De igual forma os vãos envidraçados foram aumentados ou diminuídos de forma proporcional às variações adotadas.

Esta análise demonstra que o modelo regulamentar (SCE) praticamente qualifica uma habitação pequena e uma grande com a mesma eficiência energética como se pode observar nas Figuras 57 e 58 o que fisicamente parece contraditório devido a que um espaço menor é mais fácil de aquecer que um espaço maior, e deixando de lado a inércia térmica as perdas num espaço menor serão sempre inferiores

às de um espaço superior. Isto ocorre devido a que os edifícios reais são comparados com edifícios de referência que aumentam conforme o real (não são constantes).

Embora a classificação energética mantém-se o consumo energético anual sim é afetado com as variações de áreas como apresenta-se na Figura 59.

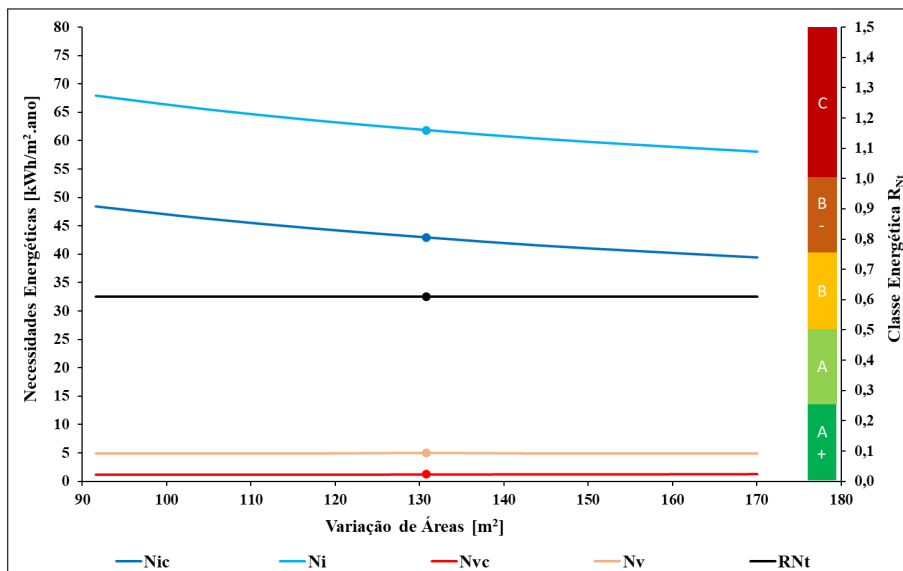


Figura 57 - Variações percentuais das áreas dos elementos da habitação M1

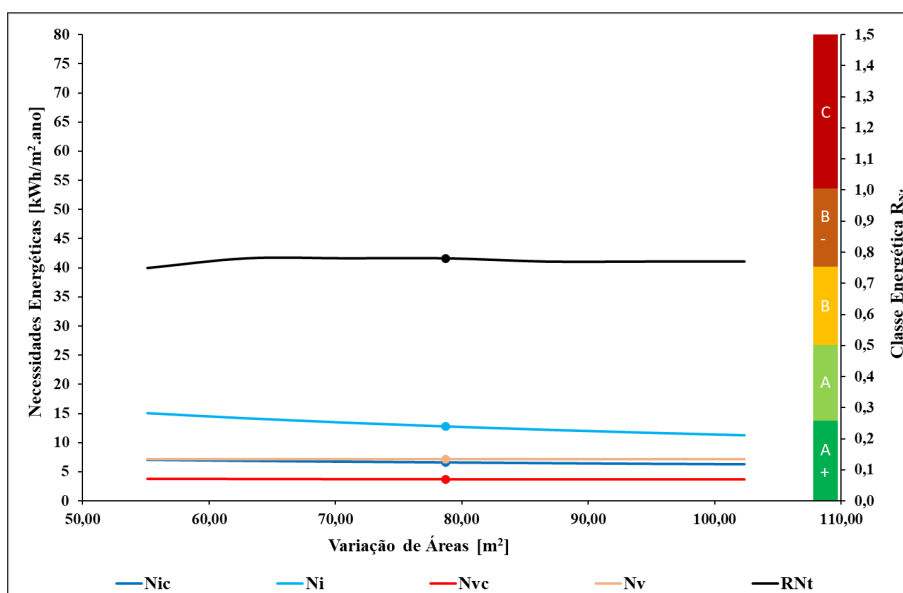


Figura 58 - Variações percentuais das áreas dos elementos da habitação A1

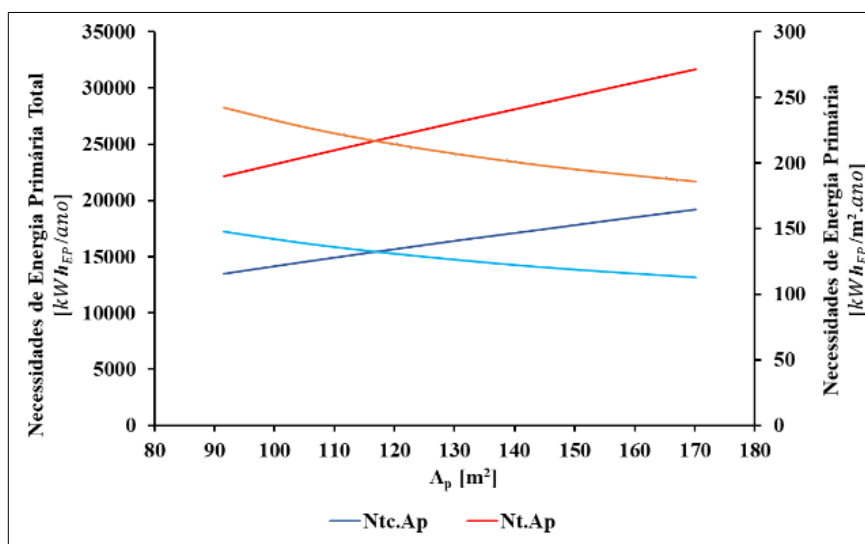


Figura 59 - Exemplo do consumo energético anual por variações de áreas na habitação M1

6.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Pretende-se aplicar de um coeficiente de variação apropriado nos parâmetros estudados que simulem de forma objetiva as incertezas possíveis.

6.3.1 Parâmetros analisados

Os parâmetros selecionados para análise de sensibilidade são aqueles estudados na análise paramétrica e aqueles que podem ser simulados de forma consecutiva numericamente mediante a utilização da folha de cálculo (IteCons). Abaixo descreve-se os parâmetros adotados e os sub-parâmetros que os afetam de forma a se ter um conhecimento de todas as incertezas associadas que podem existir no seu resultado final.

- Coeficiente de transmissão térmica de elementos opacos (U): depende diretamente da resistência térmica de todos os materiais que conformam um elemento construtivo em contato com o exterior ou com espaços não úteis (este último afetado pelo coeficiente de redução de perdas b_{tr}). Por sua vez a resistência térmica depende da espessura do material e da sua condutibilidade térmica. A formulação deste coeficiente também inclui uma resistência superficial interior e exterior, mas estas estão tabeladas no regulamento na Tabela 01 do Despacho n.º 15793-K/2013 pelo que estas podem considerar-se como de valor constante. Considera-se elementos opacos os panos de paredes, coberturas, portas e pavimentos.
- Coeficiente de transmissão térmica de elementos opacos em contato com o solo com pavimentos (U_{bf}) e paredes (U_{bw}): estes coeficientes são determinados por tabelas onde além de dependerem da resistência térmica (excluído a resistência superficial) dos materiais também dependem de outros fatores maioritariamente dimensionais como a área do pavimento útil (A_p), o perímetro exposto (P) e a largura ou profundidade do isolamento (D), embora estes elementos sejam também considerados de opacos a sua determinação é diferente ao anterior coeficiente U .
- Coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados (U_{wdn}): depende de vários fatores, mas geralmente o seu valor é fornecido pelo fabricante por obrigatoriedade da regulamentação europeia,

em caso de inexistência de informação este pode ser consultado no ITE 50 embora existe formulação para sua determinação esta é pouco utilizada.

- Pontes térmicas lineares (PTL): corresponde à união de pelo menos dois elementos construtivos com diferentes características podendo estes ser elementos exteriores ou interiores, sendo que os interiores devem possuir um b_{tr} superior ou igual a 0,7. A PTL depende diretamente de uma componente dimensional que se refere ao cumprimento da união dos elementos (B) e um coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) o qual pode ser calculado mediante a metodologia prevista na norma EN ISO 10211 ou consultado na tabela 07 do Despacho n.º 15793-K/2013 segundo os diferentes tipos de PTL.
- Renovação do ar (Rph): este fator pode ser um dos mais complexos de determinar com precisão já que depende de diferentes fatores que vão desde a localização climática, altitude geográfica, altura da fração, aberturas de admissão e exaustão, equipamentos de ventilação, vãos envidraçados, tipo de ventilação, etc.
- Fator solar global (g_T): depende do fator solar do vidro que deve ser fornecido pelo fabricante ou consultado na Tabela 12 do Despacho n.º 15793-K/2013 mas a este devem ser aplicadas correções referentes às proteções solares fixas ou móveis que possam existir num vão envidraçado tanto pelo exterior como pelo interior.
- Eficiência de sistemas técnicos (η): sejam adotados para o acondicionamento do ar interior, preparação de AQS ou ambos, estes sistemas dependem diretamente da sua eficiência energética, desde que o sistema seja alimentado por fontes de energia convencional. No caso de equipamentos alimentados por energias renováveis a eficiência não é considerada a menos que a energia utilizada seja a biomassa.
- Áreas (A), altura (H) e dimensões (D) dependem diretamente de componentes geométricos pelo que a sua incerteza está relacionada a precisão do levantamento de informação métrica que depende do PQ.

6.3.2 Dispersão de parâmetros

Para avaliar a dispersão dos parâmetros foi elaborada uma caracterização estatística das variáveis baseada na literatura, onde foram de forma comparativa avaliadas as funções de densidade de probabilidade das dispersões adotadas por outros autores para se chegar a uma dispersão média adotando por simplificação a distribuição de probabilidade normal em todos os parâmetros, o que é considerado como aceitável pois as diferenças face a outras da bibliografia são pequenas. No entanto, nota-se que para alguns parâmetros outros tipos de distribuição poderão ser mais apropriados, por exemplo nos casos em que os valores dos parâmetros fisicamente não podem ser negativos como as dimensões, RPH, etc. Esta simplificação não afetou os resultados. Assim, os coeficientes de variação adotados neste estudo estão indicados na Tabela 47.

Tabela 47 - Dispersão adotada para os parâmetros em estudo

Parâmetros	Distribuição de Probabilidade	Média (μ)		C.V.	Referencias
		M1	A1		
$U_{Env.Opac.}$	Normal	0,34	0,96	10%	[65, 96, 100-103]
U_{wdn}	Normal	2,17	3,13	10%	[65, 94, 96]
Rph	Normal	0,52	0,81	20%	[65, 89, 96, 100, 104]
Ψ_{PTL}	Normal	0,62	0,44	10%	[83]
g_T	Normal	0,14	0,14	10%	[105]
η	Normal	-	0,85	5%	[65, 89, 96, 104]
D	Normal	3	2,58	1%	[87]
A	Normal	130,83	78,74	2%	[87]
H	Normal	416	226	2%	[87]

6.3.3 Análise

De forma a obter o coeficiente de sensibilidade de cada parâmetro, as variáveis foram sujeitas a um desvio padrão positivo para analisar a variação da classe energética (R_{Ni}). A forma adotada para representar os resultados é a percentual (como se apresenta na Figura 60) pois todas as variáveis têm valores e unidades diferentes, o que não permite uma comparação entre elas.

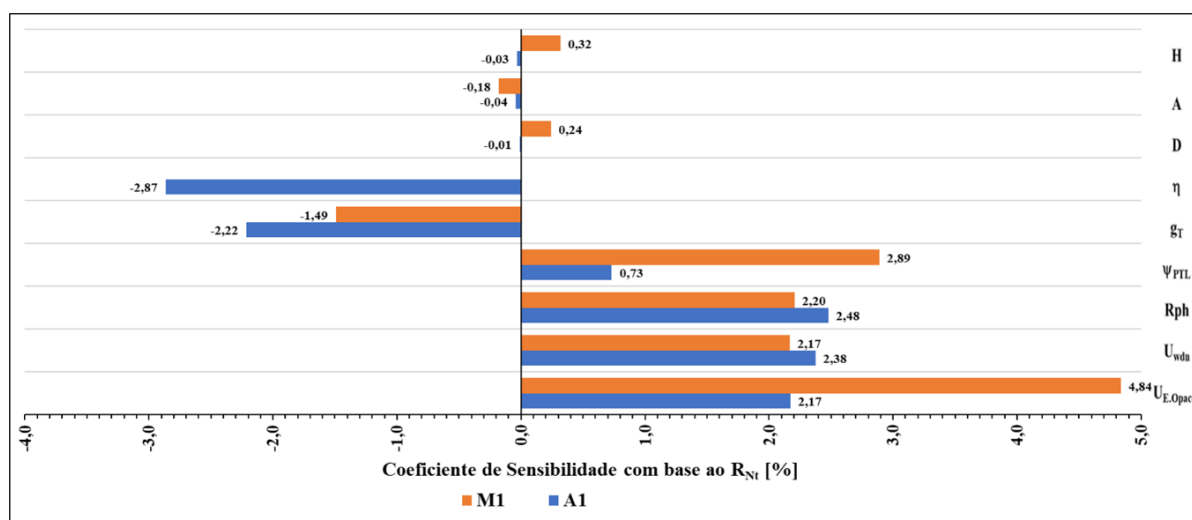


Figura 60 - Apresentação percentual do coeficiente de sensibilidade de cada parâmetro

O resultado da análise indica que de nove parâmetros estudados quatro apresentam uma influência positiva ($U_{E. Opacos}$, U_{wdn} , Rph, Ψ_{PTL}), 3 apresentam uma influência negativa (g_T , η , A) e dois uma influência diferente (D, H) para cada habitação sendo negativa na A1 e positiva na M1. Nesta análise também é possível destacar que os coeficientes de transmissão térmica das envolventes opacas e as renovações de ar são os mais relevantes no resultado da qualificação energética e por outra parte os parâmetros referentes ao levantamento de áreas, dimensões e altitude são minimamente importantes na qualificação final salvo o último estar muito próximo a uma cota onde a zona climática possa mudar o que é pouco provável na RAM onde por exemplo as mudanças da zona de inverno alteram a partir de uma cota de 710 m. Outros parâmetros como os coeficientes de transmissão térmica dos envidraçados e a eficiência dos sistemas técnicos também são muito influentes em especial quando as habitações possuem equipamentos alimentados por energias renováveis. As pontes térmicas lineares são relevantes

nos casos de habitações com grande exposição ao exterior das PTL como o caso de habitações unifamiliares isoladas como a M1.

6.4 ANÁLISE DE ROBUSTEZ

As variações que se fazem para esta análise pretendem simular incertezas dos PQ na hora de determinar certos parâmetros o que exige uma escolha que pode ser diferente de caso para caso, especialmente em edifícios existentes e em construções diferentes dos projetos.

A análise aplicada nesta secção tem como objetivo testar a robustez tomando em conta as variabilidades adotadas na secção anterior. Tudo isto aplicando a metodologia de simulação do método de Monte Carlo. De forma geral esta tarefa vai consistir em efetuar uma série de simulações (tantas como forem necessárias) que modificarão todas as variáveis estudadas na análise anterior, as simulações serão executadas para alterar todas as variáveis em simultâneo e de forma aleatória dentro dos valores fisicamente possíveis e dispostos na regulamentação, obtendo assim os resultados finais de R_{Nt} .

O número de simulações aplicadas em cada habitação foi estabelecido em 3000 simulações devido a estabilidade que se observa nas Figuras 61 e 62 dos valores cumulativos da média e do desvio padrão.

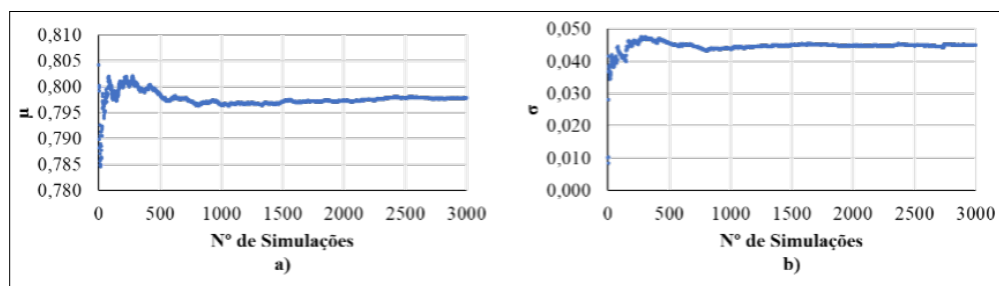


Figura 61 - Estabilização de resultados de R_{Nt} da habitação A1: a) média e b) desvio padrão

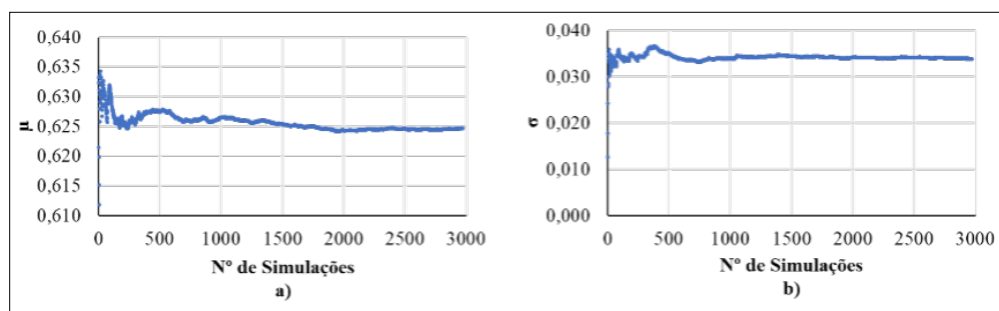


Figura 62 - Estabilização de resultados de R_{Nt} da habitação M1: a) média e b) desvio padrão

Como se observa nas figuras anteriores os valores médios de R_{Nt} divergem ligeiramente dos valores usados no capítulo anterior (Tabela 48) o que se justifica por algumas simulações conterem valores altos de U e por não conterem valores de R_{ph} menores do que $0,40 \text{ h}^{-1}$, por imposição regulamentar.

Tabela 48 - Diferenças do R_{Nt} real e médio de ambas habitações

	A1		M1	
	Estimados	Reais	Estimados	Reais
Média	0,798	0,777	0,625	0,610
Des. Padrão	0,045	-	0,034	-

Os resultados obtidos após finalizar as simulações conduzem a uma função de densidade de probabilidade que pode ser observada na Figura 63, onde graficamente se pode concluir que as curvas obtidas não correspondem a uma distribuição normal. Isto foi confirmado através de um teste numérico baseado no cálculo de coeficientes de assimetria e achatamento das curvas conhecido como “teste de normalidade”, em que após a sua aplicação os resultados indicam que as variáveis de saída (R_{Nt}) não seguem um padrão gaussiano.

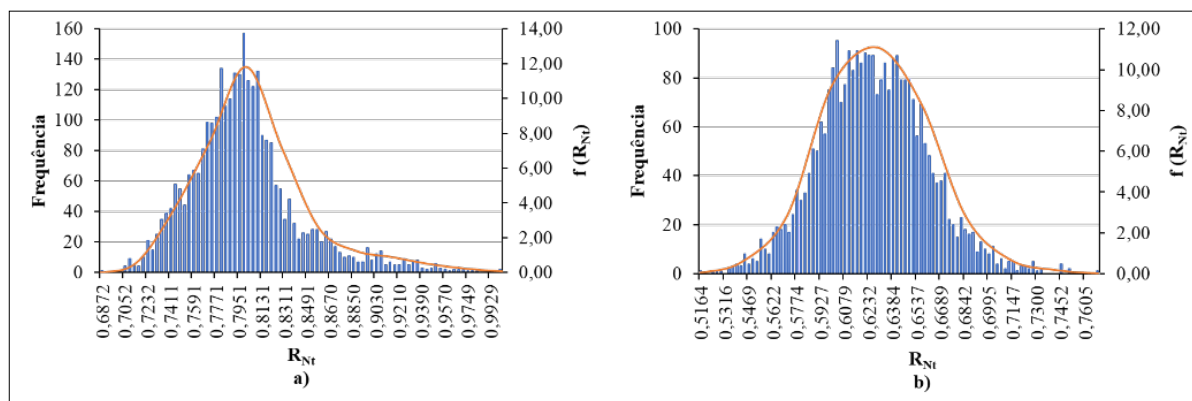


Figura 63 - Distribuição de dados simulados das habitações: a) A1 e b) M1

Nesta análise se indica que o coeficiente de variação da classificação energética em ambas habitações ronda o 5,5%. Em outros termos a metodologia de cálculo aplicada em Portugal para a emissão do certificado energético de habitações apresenta uma robustez elevada consoante a posição do seu valor real nos intervalos das classes adotados pela regulamentação. Isto pode-se constatar na Figura 64 onde avalia-se que as incertezas na hora da determinação das variáveis podem traduzir-se em pouca probabilidade de obter classes energéticas diferentes.

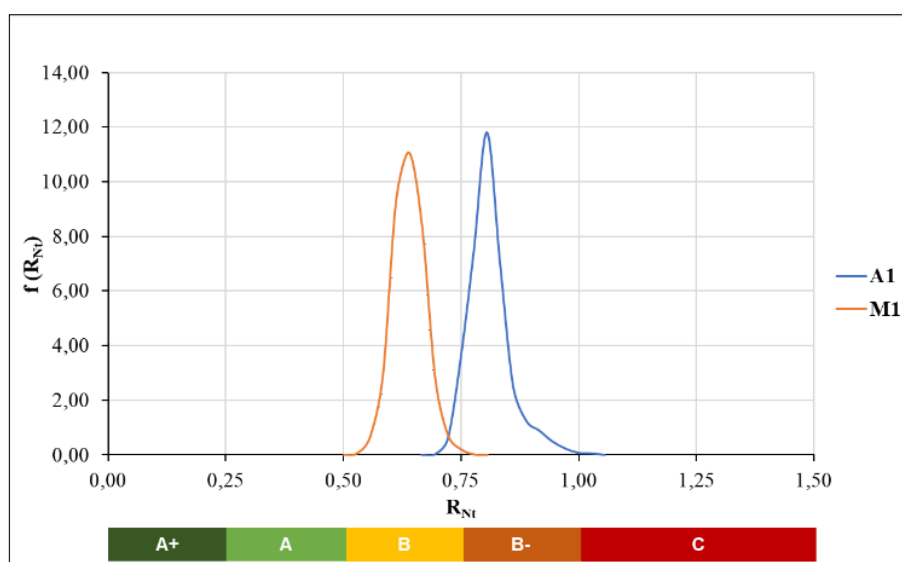


Figura 64 - Probabilidade de as habitações adotar diferentes classes energéticas

Com base na figura anterior serão testados três cenários onde no primeiro será referente a um projeto onde a sua classe energética média coincide com a fronteira entre classes energéticas (Cenário

A), o segundo o seu valor médio coincide a um quarto do intervalo da classe energética (Cenário B) e um terceiro caso onde o valor médio coincide a metade do intervalo da classe energética (Cenário C).

Apresenta-se na Figura 65 um exemplo dos cenários estudados, aplicados na habitação M1. O pretendido é calcular a probabilidade destas habitações de obterem a classe energética obtida no capítulo anterior, os resultados são expostos na Tabela 49.

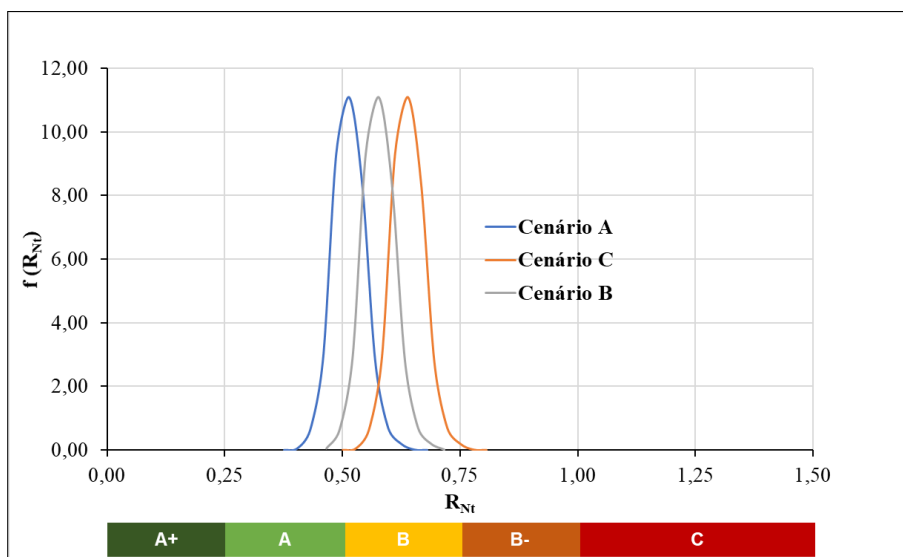


Figura 65 - Cenários para determinação de probabilidade, Habitação M1

Tabela 49 - Probabilidade de obter uma classe energética por cenários

	M1	A1
	Probabilidade de obter Classe B	Probabilidade de obter Classe B-
Cenário A	65,0 %	60,7 %
Cenário B	98,7 %	97,6 %
Cenário C	99,8 %	97,0 %

Os cenários mais correntes serão o C e o B onde pode-se apreciar que as probabilidades de manter uma mesma classe energética são muito elevadas pelo que existe uma robustez considerável da metodologia de cálculo, a isto somado que a simulação de cenários foi efetuada entre as primeiras classes onde os intervalos têm largura de 0,25 porque de ser aplicadas em classes menos eficientes como a Classe C onde intervalos são mais largos e o método claramente passaria a ser ainda mais robusto.

Capítulo 7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as conclusões obtidas coma realização deste trabalho, assim como se expõem alguns trabalhos futuros a realizar no âmbito desta temática.

7.1 CONCLUSÕES

Após as pesquisas e análises efetuadas é importante ressaltar as conclusões obtidas:

Relativamente às análises estatísticas efetuadas:

- Depois de avaliar a estabilidade da certificação energética, através da análise de robustez nos edifícios de habitação existentes (casos de estudo) conclui-se que o cálculo é consideravelmente robusto na qualificação final das habitações, considerando que após numerosas variações os resultados apresentam pouca probabilidade de adotar uma classe energética diferente.
- Após realizar a análise de sensibilidade determinou-se que os parâmetros mais influentes na classificação energética são os coeficientes de transmissão térmica, sendo que para a habitação M1 um U das envolventes opacas menos eficiente resulta numa classificação também menos eficiente. No entanto o caso da habitação A1 o parâmetro mais influente é o U das envolventes envidraçadas que curiosamente com a perda de eficiência melhora a sua classe energética. Cabe destacar que a influência mencionada para ambos casos é inferior a 5%.
- Com a variação do Rph pode-se observar que a influência que tem em aumentar as necessidades de aquecimento é maior que a que tem para diminuir as necessidades de arrefecimento. As renovações de ar podem chegar a ser um parâmetro mais relevante que o coeficiente de transmissão térmica em habitações com as condições da A1 e ainda mais se são considerados os comportamentos dos usuários.
- A variação da altitude da habitação dentro de uma mesma zona climática praticamente não altera a sua classificação energética porque existe um balanço entre as necessidades, obtido pela adaptação dos valores de referência, a única forma de existir variação numa mesma zona climática é mudando a localização geográfica da habitação.
- Quando um sistema técnico alimentado por energia renovável sustenta uma necessidade energética da habitação esta passa a ter valor nulo ou quase nulo, o que permite que a habitação tenha uma classe energética eficiente.

- Os parâmetros de sombreamento e orientação das fachadas tem nula influência na classe energética nos casos onde as habitações são isoladas e com fachadas com dimensões aproximadas, mas apresentam algumas influências em habitações com edifícios adjacentes ou em frações de edifícios multifamiliares, de forma mais direta os edifícios com menos fachadas expostas ao exterior são mais sensíveis a estes parâmetros devido a pouca incidência solar que podem chegar a ter com muitos elementos de oclusão nas suas contiguidades.
- A variação de áreas de pavimento tem praticamente uma influência nula na classificação energética o que fisicamente parece impossível que uma habitação com menor dimensão tenha a mesma classe energética que uma com maior volumetria onde as necessidades de aquecimento e arrefecimento são superiores aumentando o consumo anual de energia primária.

Relativamente aos casos de estudo:

- A literatura indica que para algumas zonas climáticas os valores admissíveis regulamentares das características dos vãos envidraçados assumem o sobreaquecimento do ambiente interior, isto pode ser evidenciado na habitação A1 quando se reduz a eficiência dos envidraçados e o resultado da classe energética assume uma melhoria.
- Após estudar e aplicar a metodologia de cálculo do SCE a edifícios de habitação existentes conseguiu-se determinar que embora a habitação M1 supera em quase 40% a área útil da habitação A1 e tendo uma percentagem consideravelmente superior no que refere a perdas e ganhos de energia nas referentes estações de aquecimento e arrefecimento, esta habitação consegue ter uma classe energética mais eficiente. Considera-se que esta classe energética mais eficiente seja pela razão de possuir um painel solar térmico destinado a preparação de AQS o que resta importância a parâmetros térmicos.
- A análise paramétrica da metodologia de cálculo permitiu observar a evolução da classificação energética conforme a variabilidade de parâmetros, por exemplo o coeficiente de transmissão térmica das envolventes opacas aplicou-se um aumento em mais de 80% para a habitação M1 e em mais de 150% na habitação A1 para alcançar uma classificação energética diferente.
- A habitação A1 com uma percentagem de vãos envidraçados menor que a habitação M1 ostenta valores de perdas de energia térmica por ventilação superiores a os valores de referência, considera-se que este facto é devido à altura da fração de habitação e aos equipamentos de exaustão de ar instalados.
- Aplicando um coeficiente de variação positivo de 10% no UEnv. opaca a classe energética da habitação M1 se torna menos eficiente em 4,84% e na habitação A1 em 2,17%. Aplicando a mesma variação no coeficiente Uwdn a habitação M1 fica menos eficiente em 2,17% e na habitação A1 2,38%.

Relativamente à metodologia de cálculo do SCE:

- É importante mencionar que embora os parâmetros térmicos como os coeficientes de transmissão térmica tenham pouca influência na classificação final, a baixa eficiência destes aumentaria o consumo de energia para manter o conforto térmico interior.

- A metodologia de cálculo é muito suscetível aos sistemas técnicos de energias renováveis. Há a possibilidade de ter edifícios com condições de comportamento térmico muito pouco eficiente, mas apresentando resultados de classe energética muito elevada, desde que os sistemas técnicos que se utilizem para satisfazer as necessidades de aquecimento, arrefecimento e preparação de AQS sejam alimentados por fontes renováveis.
- Por outra parte a não limitação de energia renovável também pode ser contraproducente incentivando o consumo de outros recursos como por exemplo a água, a qual não faz parte dos índices energéticos desta metodologia, ou o consumo descontrolado de biomassa que não devia de considerar-se 100% renovável pela implicação que tem o desflorestamento a nível climático.

Relativamente à utilização das ferramentas de cálculo:

- A exploração das ferramentas de cálculo nomeadamente as folhas de cálculo mencionadas ao longo desta dissertação permitiu chegar a classificações energéticas iguais para ambos casos de estudo. Comparando ambas folhas nota-se que a folha da PTnZEB é mais automatizada que a folha da itecons o que pode por meio dos carregamentos por bibliotecas evitar erros na entrada de parâmetros, a folha itecons permite carregar de forma manual estes parâmetros o que permite maior controlo dos dados numéricos a serem carregados, além disso a folha itecons apresenta de forma visual um maior número de resultados que a folha da PTnZEB o que foi muito útil para analisar os desenvolvimentos dos parâmetros estudados.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como desenvolvimentos futuros propõem-se:

- Realizar uma análise com diferentes casos de estudos onde se incluíam habitações com distintas configurações arquitetónicas, mas com soluções construtivas idênticas que coincidam com os valores máximos admissíveis da regulamentação para avaliar a sensibilidade da configuração geométrica das habitações.
- Estudar e avaliar as classes energéticas que podem-se obter com os requisitos mínimos de desempenho energético aplicados as envolventes e sistemas técnicos de edifícios indicados nas Portarias que estão por entrar em vigor em Portugal.
- Avaliar a elevada influência que outorga a regulamentação aos sistemas técnicos no balanço energético final, em especial aos alimentados por fontes renováveis sobre a classificação energética final. Analisar benefícios ambientais e se as classificações energéticas são adaptadas a realidade física das edificações.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IPCC, "Cambio Climático 2014 Informe de síntesis," in "Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático " Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra, Suiza 2015.
- [2] P. Europeu. (2018). Emissões de gases com efeito de estufa por país e setor (Infografia). Available:
<https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20180301STO98928/emissoes-de-gases-com-efeito-de-estufa-por-pais-e-setor-infografia>
- [3] P. I. Robledo, " Indicadores y metodología de la certificación energética en España y Europa," Tese de Mestrado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Valladolid, Espanha, 2018.
- [4] E. Gomes, "Projeto de Térmica: Aplicação do Novo Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação Novos," Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [5] M. d. A. e. d. T. Energética, " Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)," Portugal, 2019.
- [6] S. I. M. Rafael, " A Conversão Energética de Biomassa Florestal e a Qualidade do Ar," Tese de Mestrado, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2012.
- [7] I. P. o. C. Change, "Calentamiento global de 1,5 °C," 2019.
- [8] A. C. R. Henriques, "Metodologia para Cálculo das Emissões de Gases de Efeito de Estufa Associadas a Edifícios," Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.
- [9] F. Pacheco Torgal and S. Jalali, "Construção Sustentável – o caso dos materiais de construção," in Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional, Coimbra, 2007: Universidade do Minho.
- [10] U. Nations, "Perspectivas da População Mundial 2019," 2019.
- [11] C. Europeia, C. E. e. S. Europeu, and C. d. Regiões., "Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, Relativa ao desempenho energético dos edifícios," in Desempenho energético dos edifícios, ed. Bruxelas, 2010.
- [12] Regina Vilão, Catarina Venâncio, Inês Gervásio, Júlia Silva, Patrícia Liberal, and R. Ribeiro., "Relatório do Estado do Ambiente 2012," Agência Portuguesa do Ambiente, I.P., Portugal 2012.
- [13] Direção Geral de Energia e Geologia, Direção de Serviços de Planeamento Energético e Estatística, and Agência para a Energia, "Energia em Números - Edição 2019," Portugal 2019.
- [14] P. d. E. d. Ambiente, "Emissões de Gases com Efeito de Estufa," 2019.
- [15] V. Henriques, "Impacte Ambiental de Estruturas de Edifícios A Produção de CO₂," Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011.
- [16] M. F. A. M. F. d. Carvalho, "Eficiência Energetica a 4º energia, A importância das cidades para a eficiência energética - os casos das cidades do Porto e Estocolmo," Tese de Mestrado, Faculdade de Economia e Gestão, Universidade Católica Portuguesa, Lisboa, 2013.
- [17] T. Goh and B. W. Ang, "Four reasons why there is so much confusion about energy efficiency," Energy Policy, vol. 146, 2020.
- [18] L. M. P. Carreira, "nZEB, da definição à implementação em Portugal," Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Setúbal, Universidade do Algarve, Setúbal, Portugal, 2019.
- [19] P. Isolani, R. Comini, F. Puente, A. Orlandi, P. Lima, and D. Beirão, "Eficiência energética nos edifícios residenciais," Lisboa, Portugal 2008.
- [20] S. F. Tadeu, "Rentabilidade da reabilitação energética de edifícios," Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2015.
- [21] E. I. Hidalgo, "Desarrollo de un método simple para la optimización del diseño de las instalaciones en edificios residenciales de consumo energético casi nulo en el País Vasco," Tese de Doutoramento, Departamento de Ingeniería Térmica, Universidad del País Vasco, 2017.

- [22] A. Kaneva, "Análisis Normativo de la Eficiencia y Rehabilitación Energética de Edificios Caso Práctico. Vivienda Unifamiliar," Tese de Mestrado, Departamento de Urbanismo, Universitat Politècnica de València, València, Espanha, 2019.
- [23] EU, "Emisiones de gases de efecto invernadero en la UE: Se notifican correctamente, pero es necesario tener un mayor conocimiento de las futuras reducciones," Luxemburgo2019.
- [24] M. Pérez, "Estudio Comparativo de las Herramientas de Certificación Energética de Edificios Existentes," Tese de Mestrado, Escuela Técnica de Ingenieros Industriales, Universitat Politècnica de València, València, Espanha, 2019.
- [25] M. A. L. Gonçalves, "Eficiencia Energetica Edificios Historicos," Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2015.
- [26] A. B. Lopes, "Metodologia harmonizada de avaliação do comportamento térmico e desempenho energético de edificios: estudo dos ganhos solares," Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civi FCT, Universidade de Coimbra, 2016.
- [27] M. Economidou, V. Todeschi, P. Bertoldi, D. D'Agostino, P. Zangheri, and L. Castellazzi, "Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings," *Energy and Buildings*, vol. 225, 2020.
- [28] D. G. d. E. e. Geologia, "Guia-SCE Certificação Energética Edificios," Lisboa, Portugal2020.
- [29] APA. (2020). Programa Nacional para as Alterações Climáticas 2020/2030 (PNAC 2020/2030). Available: <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=117&sub3ref=1376>
- [30] P. d. E. E. n. A. Pública, "Manual de Eficiencia Energetica," 2017.
- [31] P. energia, "Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030)," Lisboa, Portugal2019.
- [32] S. Bexiga, "Aprovada Estratégia Nacional para o Hidrogénio. Investimento pode chegar aos 9 mil milhões de euros," *Executive Digest*, 2020.
- [33] A. p. a. Energia, "Conceitos e Definições do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios Habitação (REH)," 2020.
- [34] ADENE. (2015). Certificado Energético de Edifício de Habitação. Available: https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2018/06/ADENE_certificado_energ%C3%A9tico_habita%C3%A7%C3%A3o.pdf
- [35] Comissão Europeia, "Preparar o terreno para elevar o nível de ambição a longo prazo Relatório sobre a ação climática da UE de 2019," 2019.
- [36] Comissão Europeia, "Um Planeta Limpo para Todos Estratégia a longo prazo da UE para uma economia próspera, moderna, competitiva e com impacto neutro no clima," Bruxelas2018.
- [37] EU, "[77] Eficiência energética dos edificios: ainda é necessária maior ênfase na relação custo eficácia," Luxemburgo2020.
- [38] J. GABBATISS, "Coronavírus: a recuperação verde 'poderia prevenir 0,3 ° C' do aquecimento até 2050," *Carbon Brief*, 2020.
- [39] E. E. Agency, "COVID-19 e ..." planeta pós-corona, 2020.
- [40] A. P. d. Ambiente, "Inventário Nacional de Emissões 2020," Lisboa, Portugal2020.
- [41] E. S. Agency. (2020). Sentinel-5P coloca a poluição do ar em destaque. Available: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Portugal/Sentinel-5P_coloca_a_poluicao_do_ar_em_destaque
- [42] A. p. a. Energia, "Estudo de mercado no âmbito das campanhas de sensibilização e de promoção da eficiência energética na Habitação Particular," 2017.
- [43] ADENE. (2018). Simulador casA+. Available: <https://www.adene.pt/adene-lanca-o-simulador-casamais/>
- [44] C. Europeia, C. E. e. S. Europeu, and C. d. Regiões, "Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho," in *Altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edificios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética*, ed, 2018.
- [45] MEE, "Decreto-Lei n.º 118/2013 Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços," ed, 2013.
- [46] R. N. Coutinho, "Relação entre o Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação com o Conceito de Edifício com Necessidades Quase Nulas De Energia," Tese de Mestrado, Engenharia, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014, 2014.

- [47] B. U. P. E. p. a. E. E. e. Edifícios). (2016). What is a "plus energy building" or "energy surplus building"? Available: <https://www.buildup.eu/en/learn/ask-the-experts/what-plus-energy-building-or-energy-surplus-building-0>
- [48] MAOTE, "Portaria n.º 349-B/2013 Metodologia de determinação da classe de desempenho energético para a tipologia de pré-certificados e certificados SCE, bem como os requisitos de comportamento técnico e de eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos e edifícios sujeitos a grande intervenção," 2013.
- [49] DGEG, "Despacho n.º 15793-D/2013 Fatores de conversão entre energia útil e energia primária a utilizar na determinação das necessidades nominais anuais de energia primária," ed, 2013.
- [50] DGEG, "Despacho n.º 15793-E/2013 Regras de simplificação a utilizar nos edifícios sujeitos a grandes intervenções, bem como existentes," ed, 2013.
- [51] DGEG, "Despacho n.º 15793-F/2013 Publicação dos parâmetros para o zonamento climático e respetivos dados," ed, 2013.
- [52] DGEG, "Despacho n.º 15793-H/2013 Regras de quantificação e contabilização do contributo de sistemas para aproveitamento de fontes de energia de fontes de energia renováveis, de acordo com o tipo de sistema," ed, 2013.
- [53] Despacho n.º 15793-I/2013 Metodologias de cálculo para determinar as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento e arrefecimento ambiente, as necessidades nominais de energia útil para a produção de águas quentes sanitárias (AQS) e as necessidades nominais anuais globais de energia primária, 2013.
- [54] DGEG, "Despacho n.º 15793-J/2013 Publicação das regras de determinação da classe energética," ed, 2013.
- [55] DGEG, "Despacho n.º 15793-K/2013 Publicação dos parâmetros térmicos para o cálculo dos valores que integram o presente despacho," ed, 2013.
- [56] S. F. Ferreira, "Impacte da Nova Regulamentação na Certificação Energética de Edifícios," Tese de Mestrado, ISE, Universidade do Algarve, Algarve, Portugal, 2016.
- [57] MATE, "Portaria n.º 98/2019," in Terceira alteração da Portaria n.º 349-B/2013, ed, 2019.
- [58] ADENE, "Guia-SCE-Indicadores de Desempenho Energético (REH)," 2020.
- [59] LNEC. (2013). Ferramenta de cálculo da ventilação para edifícios de habitação e para pequenos edifícios de comércio e serviços. Available: <http://www.lneg.pt/pt/servicos/ferramentas/aplicacoes/eficiencia-energetica/>
- [60] LENEG. (2020). Software SOLTERM5. Available: <https://www.lneg.pt/service/informacao-tecnica/software/solterm5/>
- [61] DGEG. (2016). SCE.ER - Dados e cálculos para aproveitamento de Energias Renováveis em edifícios. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/sce-er/>
- [62] Itecons. (2020). Ferramentas de cálculo DL 118/2013. Available: <http://www.itecons.uc.pt/p3e/index.php>
- [63] PTnZEB. (2016). Ferramentas de Cálculo destinadas à verificação regulamentar no âmbito do Dec.-Lei 118/2013, tanto para edifícios de habitação (REH) como para edifícios de comércio e serviços (RECS). Available: <http://www.pt-nzeb.pt/e-learning/course/index.php?categoryid=1>
- [64] E. Maia, "Análise do Desempenho Térmico de Soluções Construtivas na Reabilitação de Edifícios de Habitação," Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2018.
- [65] L. V. Gelder, "A probabilistic design methodology for building performance optimisation An application to low-energy dwellings," Tese de Doutoramento, Faculty of Engineering Science, KU Leuven, Belgium, 2014.
- [66] C. F. d. B. Piana, A. d. A. Machado, and L. P. R. Selau, "Estatística Básica," ed. Pelotas, 2009.
- [67] A. A. R. Henriques, "Aplicação de novos conceitos de segurança no dimensionamento de betão estrutural," Teses de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1998.
- [68] M. E. G. Martins, "Introdução à Probabilidade e à Estatística," ed: Departamento de Estatística e Investigação Operacional da FCUL, 2005.
- [69] P. Action. Available: <http://www.portalaction.com.br/probabilidades/615-distribuicao-log-normal>

- [70] L. Minitab. Suporte ao Minitab 18. Available: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/reliability/supporting-topics/distribution-models/lognormal-distribution/>
- [71] E. A. F. Flores, "Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo ", Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- [72] D. N. B. M. d. Abreu, "Teste à Robustez do Método de Avaliação de Caminhabilidade IAAPE," Dissertação de Mestrado, IST, Técnico Lisboa, Lisboa, 2017.
- [73] F. L. A. Ribeiro, "Análise de robustez de estruturas sujeitas a eventos sísmicos consecutivos," Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [74] M. Palme, "La sensibilidad energética de los Edificios," Tese de Doutoramento, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Espanha, 2010.
- [75] T. Hoskin, "Parametric and Nonparametric: Demystifying the Terms," Mayo Clinic Department of Health Sciences, 2012.
- [76] B. Roy, "Robustness in operational research and decision aiding: A multi-faceted issue," European Journal of Operational Research, vol. 200, no. 3, pp. 629-638, 2010.
- [77] C. Zang, M. I. Friswell, and J. E. Mottershead, "A review of robust optimal design and its application in dynamics," Computers & Structures, vol. 83, no. 4-5, pp. 315-326, 2005.
- [78] A. Curado, "Conforto Térmico e Eficiência Energética nos Edifícios de Habitação Social Reabilitados," Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.
- [79] C. Araújo, M. Almeida, and L. Bragança, "Analysis of some Portuguese thermal regulation parameters," Energy and Buildings, 2013.
- [80] J. D. C. Francisco, "Análise Paramétrica de uma Solução Passiva para uma Habitação com Estrutura Leve em Aço," Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015.
- [81] E. V. L. Sivila, "Análisis y Propuesta de un Nuevo Método de Simulación Abreviado Para la Certificación Energética en Edificios Residenciales," Tese de Doutoramento, Departamento de Termodinámica Aplicada, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Espanha, 2011.
- [82] H. Krstić and M. Teni, "Analysis of Energy Performance and Buildings Characteristics Obtained from Croatian Energy Management Information System," International Journal of Structural and Civil Engineering Research, pp. 252-258, 2018.
- [83] J. N. B. Fonseca, "Modelação estatística do desempenho energético do parque habitacional português " Disertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.
- [84] H. Arham, "Valoración de la Respuesta Térmica en Edificios: La Repercusión Dinámica De La Envoltante," Tese de Doutoramento, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Espanha, 2005.
- [85] S. Pinheiro, "Análise do Comportamento Térmico de Habitações Unifamiliares tendo em conta o conforto dos seus ocupantes," Teses de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho, 2013.
- [86] G. Costa, "Análise de sensibilidade ao balanço energético de edifícios de habitação," Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2019.
- [87] S. Ferozshani, "Uncertainty in Building Energy Simulation and Its Implications for the British Columbia Energy Step Code," eSim 2021 Conference 2020.
- [88] J. P. O. M. d. S. Alves, "Classificação do desempenho energético de edifícios residenciais com base em algoritmos imunológicos," Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.
- [89] A. Galimshina et al., "Statistical method to identify robust building renovation choices for environmental and economic performance," Building and Environment, vol. 183, 2020.
- [90] F. Shahsavari, W. Yan, and R. Koosha, "A case study for sensitivity-based building energy optimization," presented at the ARCC 2019, Toronto, Canadá, 2019.
- [91] T. Picard, T. Hong, N. Luo, S. H. Lee, and K. Sun, "Robustness of energy performance of Zero-Net-Energy (ZNE) homes," Energy and Buildings, vol. 224, 2020.

- [92] R. Koosha and F. Shahsavari, "An Uncertainty and Sensitivity Analysis Tool for Building Thermal Energy Consumption: A Performance Comprehension of Static and Dynamic Response Analyses," presented at the International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Anaheim, CA, USA, 2019.
- [93] C. C. Antonio, H. Santos, R. Oliveira, and E. O. Fernandes, "A Preliminary Analysis of Some Parameters' Importance in Building Energy Efficiency Assessment," INEGI/FEUP, 2017.
- [94] C. Favi, E. Di Giuseppe, M. D'Orazio, M. Rossi, and M. Germani, "Building Retrofit Measures and Design: A Probabilistic Approach for LCA," *Sustainability*, vol. 10, no. 10, 2018.
- [95] J. Adamczyk and R. Dylewski, "Analysis of the sensitivity of the ecological effects for the investment based on the thermal insulation of the building: A Polish case study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 162, pp. 856-864, 2017.
- [96] P. Im, R. Jackson, Y. Bae, J. Dong, and B. Cui, "Probabilistic reliability assessment and case studies for predicted energy savings in residential buildings," *Energy and Buildings*, vol. 209, 2020.
- [97] A. Figueiredo, J. Figueira, R. Vicente, and R. Maio, "Thermal comfort and energy performance: Sensitivity analysis to apply the Passive House concept to the Portuguese climate," *Building and Environment*, vol. 103, pp. 276-288, 2016.
- [98] R. Gagnon, L. Gosselin, and S. Decker, "Sensitivity Analysis of Energy Performance and Thermal Comfort Throughout Building Design Process," Elsevier, 2018.
- [99] P. de Wilde, "The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation," *Automation in Construction*, vol. 41, pp. 40-49, 2014.
- [100] L. Van Gelder, H. Janssen, and S. Roels, "Probabilistic design and analysis of building performances: Methodology and application example," *Energy and Buildings*, vol. 79, pp. 202-211, 2014.
- [101] Fatemeh Shahsavari, Rasool Koosha, Milad R. Vahid, Wei Yan, and M. Clayton, "[208] Towards the Application of Uncertainty Analysis."
- [102] I. Novo, "Propriedades Higrotérmicas de Materiais – Construção de Base de Dados Estocásticos para Simulação Numérica.," Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [103] I. A. Macdonald, "Quantifying the Effects of Uncertainty in Building Simulation.," Doutoramento, Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, United Kingdom, 2002.
- [104] Y. Heo, R. Choudhary, and G. A. Augenbroe, "Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty," *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 550-560, 2012.
- [105] F. Domínguez-Muñoz, J. M. Cejudo-López, and A. Carrillo-Andrés, "Uncertainty in peak cooling load calculations," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 7, pp. 1010-1018, 2010.

Anexo 1

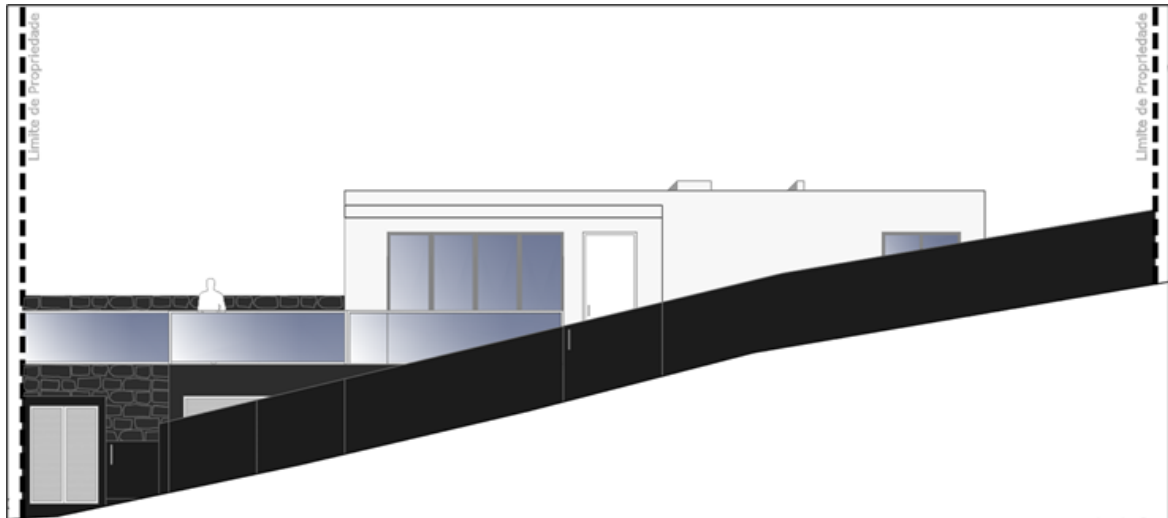


Figura A 1 - Alçado da fachada principal da Habitação M1

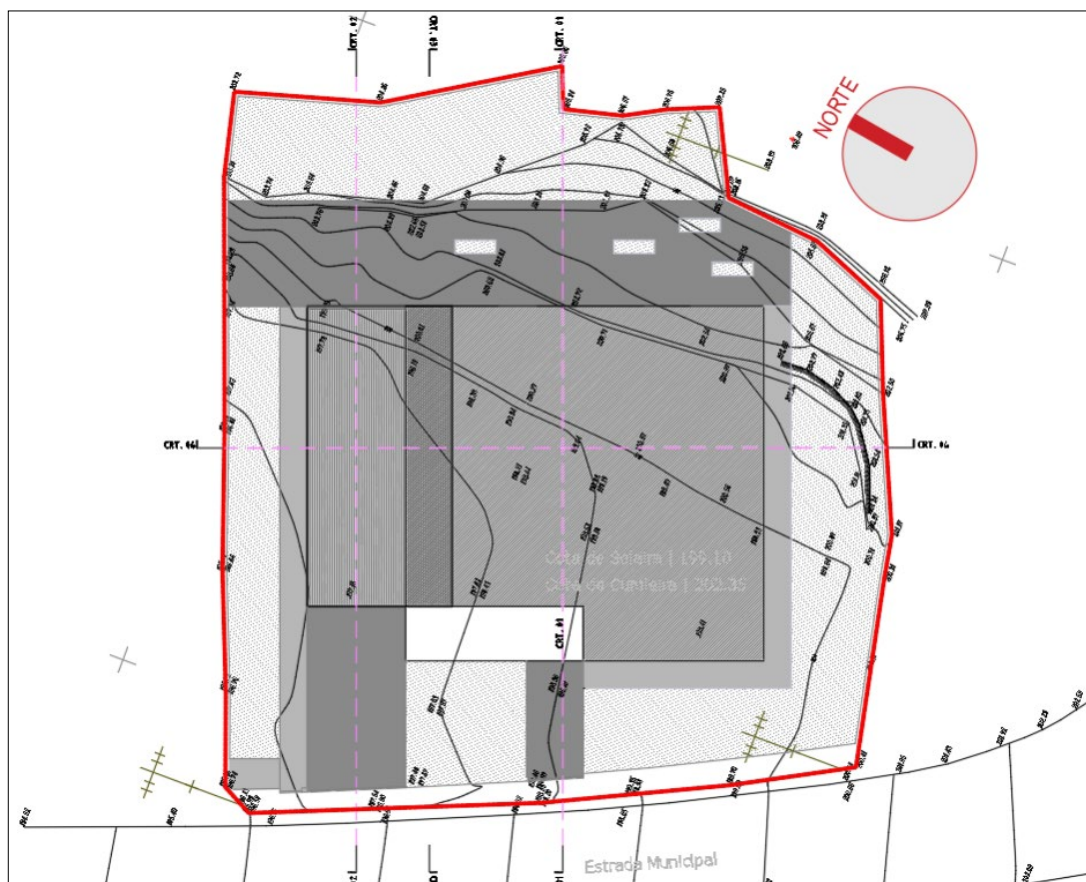


Figura A 2 - Orientação da Habitação M1 (Planta de implantação)

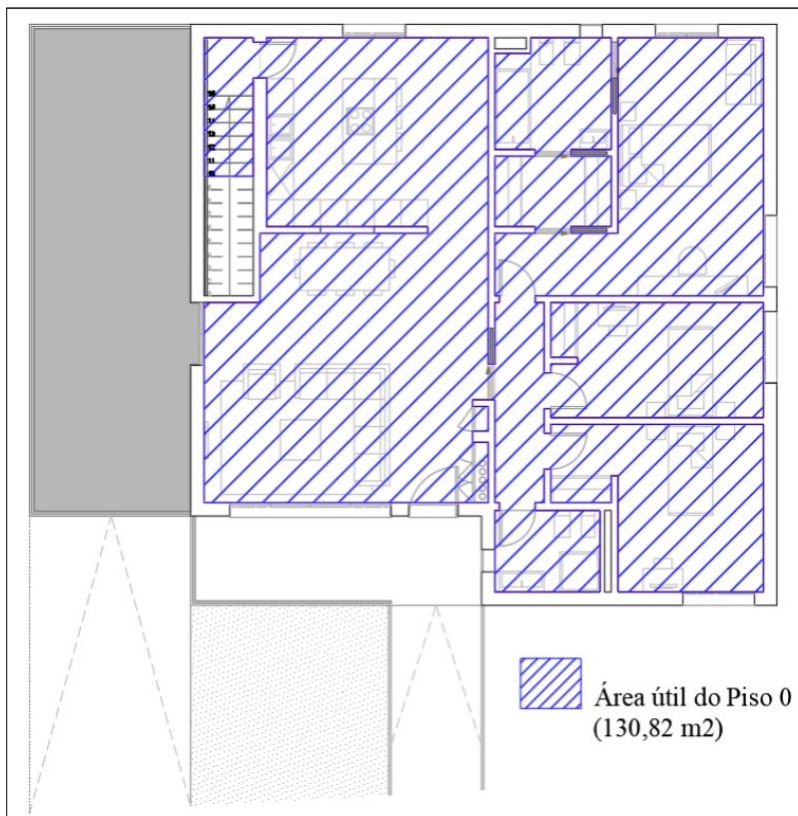


Figura A 3 - Áreas uteis da habitação M1

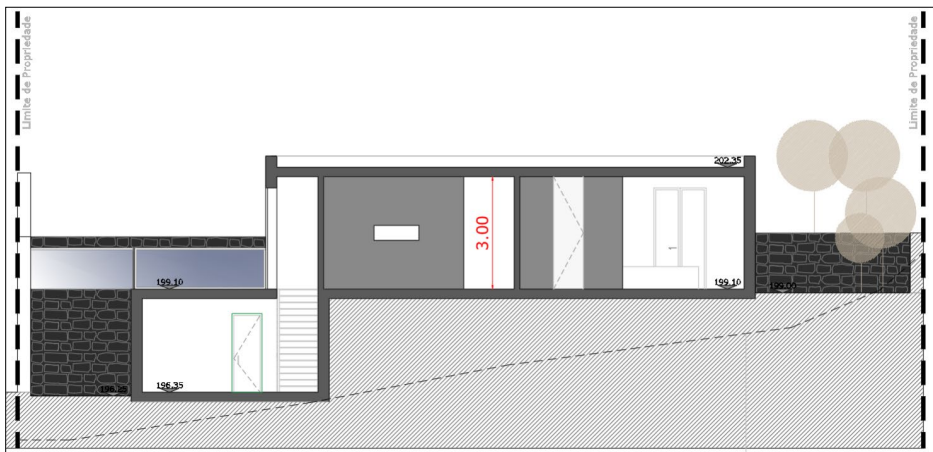


Figura A 4 - Pé direito dos compartimentos interiores

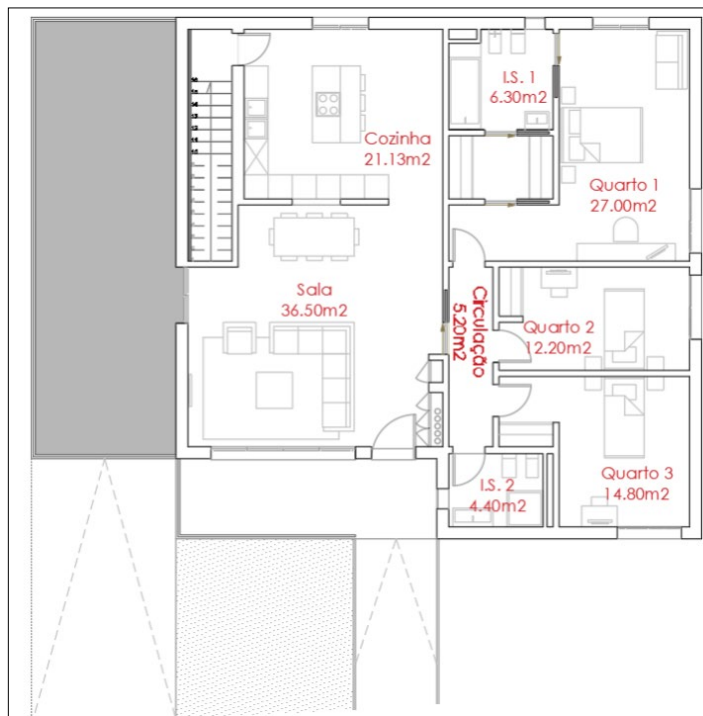


Figura A 5 - Identificação de compartimentos e áreas da Habitação M1

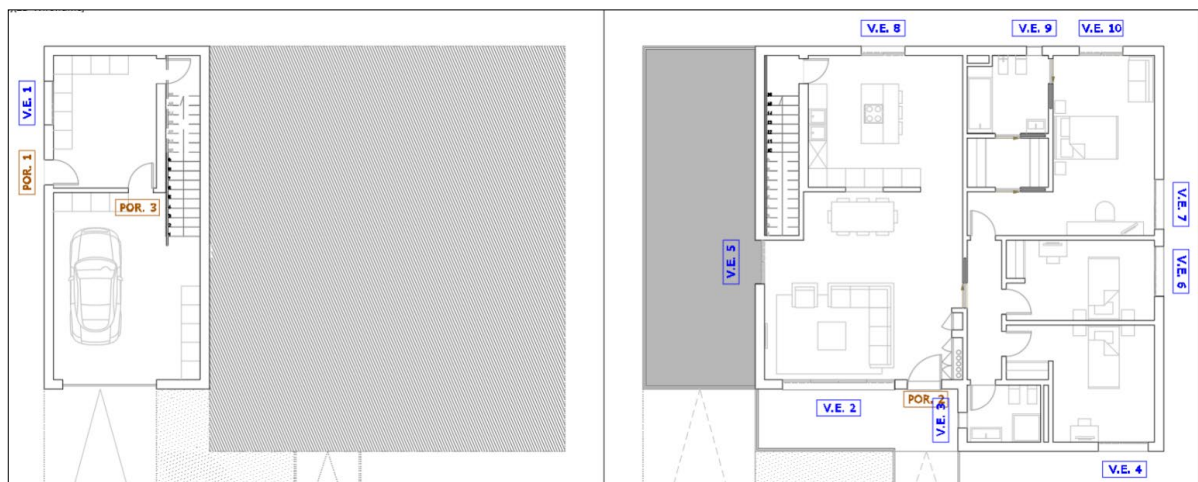


Figura A 6 - Identificação de vãos opacos e envidraçados da Habitação M1



Figura A 7 - Fachada principal orientada ao sul



Figura A 8 - Levantamento de áreas dos compartimentos da habitação A1



Figura A 9 - Altura do pé direito da habitação A1



Figura A 10 - Modelo de elementos de admissão e exaustão de ar da habitação A1

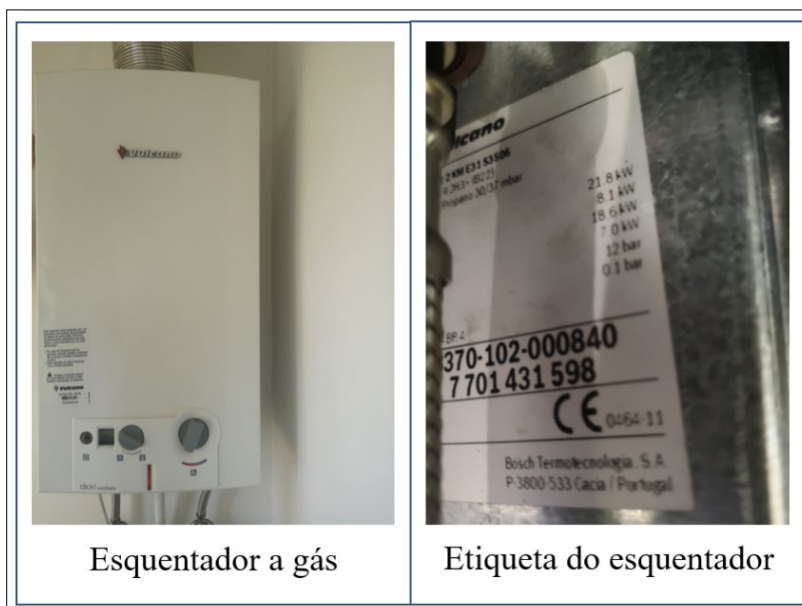


Figura A 11 - Modelo do esquentado de AQS da habitação A1