



**Universidade de
Aveiro
2014**

Departamento de Engenharia Civil

**José Carlos Sousa
Figueira**

**Simulação do comportamento térmico e
energético de Passive Houses em Portugal**



**José Carlos Sousa
Figueira**

**Simulação do comportamento térmico e
energético de Passive Houses em Portugal**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos parciais necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sobre a orientação científica do Professor Doutor Romeu da Silva Vicente, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação científica da Professora Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Aos meus pais e avós

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Velosa
Professora Associada da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (arguente)

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos

Chegou ao fim mais uma preciosa etapa da minha formação. Além da enriquecedora experiência que este projeto proporcionou na vertente técnica científica, o conceito de trabalho honesto e persistente, abnegação e auto motivação constituíram uma parte importante na minha formação – técnica e pessoal. Não poderia deixar de agradecer a todos aqueles que contribuíram para a minha realização.

Assim, gostaria de agradecer ao meu orientador Exmo. Senhor Professor Doutor Romeu Vicente pela sua inteira disponibilidade, partilha de conhecimento e dedicação. À minha coorientadora Exma. Senhora Professora Doutora Fernanda Rodrigues pela igual disponibilidade e ajuda prestada.

Um agradecimento muito especial ao aluno de Doutoramento António Figueiredo pelo seu apoio incondicional durante todo o trabalho que desenvolvi, bem como pela sua paciência e disponibilidade. Ao aluno de Investigação Rui Oliveira também pela importante ajuda prestada.

Um igualmente especial bem-haja, aos amigos pelo apoio permanente e companheirismo durante todo o meu percurso académico, em especial ao André Guimarães, Pedro Gamelas, Pedro Ferreira, Eurico Correia.

Por fim, às pessoas a quem eu dedico este trabalho, os meus pais e os meus avós que me proporcionaram esta grande experiência e me apoiaram durante todo o meu percurso académico, um enorme obrigado.

palavras-chave

Eficiência Energética, Passive House, Simulação Dinâmica de Edifícios, Conforto Térmico

resumo

Devido à forma como a construção civil e obras públicas desenvolvem a sua actividade, as necessidades energéticas têm revelado um importante crescimento nos últimos anos. O setor dos edifícios representa cerca de 40% da energia consumida na União Europeia. A comissão Europeia estabeleceu uma diretiva para a sensibilização dos cidadãos sobre o preocupante fenómeno de aquecimento global. Com o objetivo da redução de emissão de gases para a atmosfera, segundo a EPBD 2010/31/EU, todos os edifícios construídos a partir de 2020, ou 2018 para edifícios públicos de serviços, deverão ser do tipo *net zero energy buildings* (NZEB), edifícios de baixíssimo consumo energético. Das diversas estratégias possíveis, considera-se que o conceito de *Passive House* (PH) é uma forte premissa para alcançar os objectivos traçados. No entanto, a sua implementação deverá ser adaptada e enquadrada com as soluções construtivas à realidade climática local. O conceito PH compreende 5 princípios básicos que o tornam energeticamente eficiente: excelente isolamento térmico, sistema de ventilação com recuperação de calor, correção e minimização de pontes térmicas, janelas eficientes e uma boa estanquidade.

O estudo desenvolvido pretende contribuir para a implementação do conceito PH em Portugal, através de um estudo detalhado para a região de Aveiro e um estudo mais abrangente ainda que simplificado para outras regiões climáticas representativas do país.

Foi escolhido para o caso de estudo um edifício de habitação unifamiliar, constituído por uma estrutura de aço leve pré-fabricada, com uma arquitectura contemporânea. Foi desenvolvido um modelo numérico com base na tipologia construtiva original, a partir do qual, foram realizados estudos de sensibilidade com o objectivo de cumprir os parâmetros definidos pela norma PH. Foram previstas alterações ao nível do isolamento térmico, do tipo de envidraçados, dos sistemas de ventilação mecânica, tipos de ventilação natural e utilização de sistemas automáticos de proteção solar. Para os modelos com os resultados mais interessantes foi estudado o seu comportamento térmico, foi feita uma avaliação do conforto dos ocupantes e estimadas as necessidades energéticas.

Por fim, foi estudado de forma simplificada a aplicabilidade deste conceito a outras zonas do país. Foram escolhidos alguns dos cenários resultantes do estudo de sensibilidade para 4 regiões geográficas representativas do território nacional e posteriormente avaliado o conforto desses cenários e as respectivas necessidades energéticas.

keywords

Energy Efficiency, Passive House, Dynamic Building Simulation, Thermal Performance, Indoor Comfort

abstract

Energy demand in recent years has shown significant growth, with compelling implications for how the construction public works develops its activity. The building sector presents an estimate of about 40% of the energy consumed over Europe. The European commission established actions and goals to aware citizens about the worrying phenomenon of global warming. With the objective of reducing the emission of greenhouse gases into the atmosphere, according to the EPBD 2010/31/EU, all buildings constructed after 2020, or after 2018 for public service buildings, should be net zero energy buildings (NZEB). There are many passive strategies to achieve this goal, but it is considered that the Passive House (PH) concept is the best strategy, although it is necessary to adapt the building technology and requirements to the local climate conditions. The (PH) concept comprises five basic principles: excellent thermal insulation, efficient windows, perfect air tightness, correction/minimization of thermal bridges and a ventilation system with heat recovery.

The study developed aims at contributing to the implementation of the PH concept in Portugal, through a detailed study for the region of Aveiro and a simpler approach to other regions of the country.

For the present study, the building simulated was a detached house with contemporary architecture for the region of Aveiro. The house consists of a prefabricated lightweight structure. A numerical model was developed based on the original design solution. From this model, parametric studies were carried out in order to meet the parameters defined by the PH standard: i) thickness of thermal insulation; ii) type of glazing; iii) the mechanical ventilation system; iv) natural ventilation/free cooling, and; v) use of automated systems for closure of sun protection systems. For the models with the most interesting results, an assessment was made of the comfort and estimated energy demand.

The applicability of Passive House to other climatic zones of the country has been also studied but in a simplified manner. Some of the scenarios resulting from the parametric studies for four representative geographical regions were chosen and subsequently assessed in terms of comfort and energy demand.

Índice Geral

Índice de Figuras	XIX
Índice de Tabelas.....	XXIII
Capítulo 1 - Introdução.....	3
1.1 - Enquadramento Geral	3
1.2 - Objetivos	5
1.3 - Organização e Estrutura da Dissertação.....	5
Capítulo 2 - <i>Passive House</i>	9
2.1 - Enquadramento	9
2.2 - Requisitos Térmicos <i>Passive House</i>	11
2.3 - Princípios Básicos.....	12
2.3.1 - Isolamento Térmico	13
2.3.2 - Janelas Eficientes.....	14
2.3.3 - Sistema de Ventilação com Recuperação de Calor.....	15
2.3.4 - Estanquidade.....	17
2.3.5 - Correção e Minimização de Pontes Térmicas.....	19
Capítulo 3 - Simulação Dinâmica	23
3.1 - Enquadramento	23
3.2 - Aplicações da Simulação Dinâmica em Edifícios	24
3.3 - Programas de Cálculo de Simulação Dinâmica	25
3.3.1 - Enquadramento	25
3.3.2 - <i>EnergyPlus</i> : Programa Selecionado.....	26
3.3.3 - Aplicações do Programa <i>EnergyPlus</i>	27
3.3.4 - Cálculo Do Balanço Térmico no Programa <i>EnergyPlus</i>	29
Capítulo 4 - Descrição do Caso de Estudo	37
4.1 - Zona Climática.....	37
4.1.1 - Enquadramento	37
4.1.2 - Ficheiro de Dados Climáticos	38
4.1.3 - Caracterização do Clima na Região de Aveiro	40
4.2 - Caracterização do Caso de Estudo.....	42
4.2.1 - Implantação do Edifício	42

4.2.2 - Geometria e Factor de Forma.....	43
4.3 - Caracterização da Envolvente Exterior do Edifício	46
4.3.1 - Soluções Construtivas e Propriedades Térmicas.....	46
4.3.2 - Soluções Construtivas da Envolvente	47
4.3.2.1 - Laje de Piso Térreo	47
4.3.2.2 - Paredes Exteriores.....	48
4.3.2.3 - Pavimento Intermédio.....	49
4.3.2.4 - Cobertura Plana.....	50
4.3.2.5 - Vãos - Portas e Envidraçados.....	52
4.3.3 - Efeito das Pontes Térmicas na Envolvente Exterior	53
Capítulo 5 - Simulação Dinâmica: Aplicação ao Caso de Estudo	59
5.1 - Modelo Numérico	59
5.1.1 - Enquadramento	59
5.2 - Premissas de Simulação.....	60
5.2.1 - Geometria do Modelo	60
5.2.2 - Vãos de Portas e Janelas	61
5.2.3 - Definição de Zonas Térmicas	62
5.2.4 - Propriedades Termofísicas dos Materiais	63
5.2.5 - Calibração do Coeficiente de Transmissão Térmica da Envolvente Opaca Exterior	64
5.2.6 - Definição dos Ganhos Internos	64
5.2.7 - Ventilação Mecânica e Natural	65
5.2.8 - Necessidades Energéticas Primárias do Edifício	68
5.2.9 - Distribuição Solar	69
5.2.10 - Convergência Numérica e Tempo de Simulação	70
5.2 - Estudos Paramétricos	71
Capítulo 6 - Resultados dos Estudos de Sensibilidade	77
6.1 - Análise do Conforto Térmico	77
6.2 - Caso de Estudo Original	80
6.2.1 - Comportamento Térmico do Caso de Estudo Original sem Sistema de Ventilação	81
6.2.1.1 - Estação de Aquecimento – Comportamento Térmico	83
6.2.1.3 - Estação de Arrefecimento – Comportamento Térmico.....	85
6.2.2 - Comportamento Térmico do Caso de Estudo Original com Sistema de Ventilação	87
6.2.2.3 - Necessidades Energéticas	88
6.3 - Optimizações – Resultado Estudos Paramétricos	89

6.3.1 - Avaliação do Conforto Durante a Estação de Aquecimento.....	91
6.3.2 - Avaliação do Desconforto Durante a Estação de Arrefecimento –.....	96
6.3.3 - Necessidades Energéticas	99
6.4 - Estudos Complementares.....	100
6.4.1 - Influência do Comportamental dos Ocupantes na Operacionalidade das Protecções Solares.....	100
6.4.2 - Influência do Aumento da Inércia Térmica das Soluções Construtivas no Comportamento Térmico do Edifício.....	103
6.5 - Estudo do Desempenho Térmico para Diferentes Regiões.....	105
6.5.1 - Escolha das Regiões Representativas do Clima de Portugal	105
6.5.2 - Necessidades Energéticas	107
6.5.2.1 - Aveiro	107
6.5.2.2 - Bragança	108
6.5.2.3 - Évora.....	109
6.5.2.4 - Faro	110
6.5.3 - Avaliação do Desconforto.....	110
6.5.3.1 - Aveiro	111
6.5.3.2 - Bragança	111
6.5.3.3 - Évora.....	112
6.5.3.4 - Faro	113
6.6 - Síntese Geral.....	113
Capítulo 7 - Considerações Finais.....	119
7.1 - Síntese do Trabalho Realizado.....	119
7.2 - <i>Passive House</i> em Portugal.....	119
7.3 - Simulação Dinâmica	119
7.4 - Geometria e Tipologia Construtiva do Modelo	119
7.5 - Estudos Paramétricos	120
7.5.1 - Edifício Referência – Sistema de Construção Original.....	120
7.5.2 - Estudo Paramétricos para a região de Aveiro	120
7.5.3 - Outras Regiões – Capitais de Distrito.....	122
7.6 - Desenvolvimento de Estudos Futuros.....	123
Bibliografia	127
Anexo A - Propriedades do Modelo Original Retiradas do Programa <i>EnergyPlus</i>	135
Anexo B - Fichas Técnicas.....	138

Anexo C - Resultados de Todos os Cenários Simulados para a Região de Aveiro 144

Índice de Figuras

Figura 1 - Simulação da variação da temperatura média do ar até ao final do século - adaptada de [2]	4
Figura 2 - Primeira <i>Passive House</i> em Damstadt-Kranichstein – adaptado de [4]	10
Figura 3 - Princípios básicos de uma <i>Passive House</i> – adaptado de [9]	12
Figura 4 - Termografia de duas vivendas – retirado de [11]	13
Figura 5 - Imagem de infravermelhos do interior de uma janela de uma <i>Passive House</i> – retirado de [8]	14
Figura 6 - Permutador de calor - adaptado de [8].....	16
Figura 7 - Esquema de insuflação/extracção de ar de uma <i>Passive House</i> – adaptada de [8]	17
Figura 8 - Isolamento <i>Red Pencil Method</i> – retirado de [8]	18
Figura 9 - <i>Blower Door Test</i> – retirado de [14].....	18
Figura 10 - Pontes térmicas de um edifício – retirado de [15]	19
Figura 11 - <i>Thermal Bridge Free Design</i> – retirado de [8]	20
Figura 12 - Modelação numérica de um edifício – retirado de [20].....	23
Figura 13 - Imagens de utilitários e resultados do programa <i>EnergyPlus</i> – retirado de [26].....	27
Figura 14 - Esquema do programa <i>EnergyPlus</i> adaptado de [27]	29
Figura 15 - Localização do edifício (<i>GoogleEarth</i>)	37
Figura 16 - Perfis de altitude (<i>GoogleEarth</i>).....	38
Figura 17 - Velocidade média mensal do vento (m/s) por orientação.....	39
Figura 18 - Frequência de incidência do vento por orientação	40
Figura 19 - Média diária da temperatura exterior em Aveiro entre 1961 e 1990	41
Figura 20 - Média horária da radiação solar horizontal mensal em Aveiro	41
Figura 21 - Probabilidade cumulativa da temperatura exterior em Aveiro	42
Figura 22 - Enquadramento do edifício de estudo	42
Figura 23 - Plantas de arquitectura.....	44
Figura 24 - Alçados do edifício.....	44
Figura 25 - Exemplo de heterogeneidades das soluções construtivas da envolvente exterior	46
Figura 26 - Pormenor laje de piso térreo – 1 (s/escala).....	47
Figura 27 - Pormenor laje de piso térreo – 2 (s/escala).....	48
Figura 28 - Pormenor da parede de envolvente exterior – 1 (s/escala)	48
Figura 29 - Pormenor da parede de envolvente exterior – 2 (s/escala)	49
Figura 30 - Pormenor laje de pavimento interior - 1 (s/escala).....	49
Figura 31 - Pormenor laje de pavimento interior - 2 (s/escala).....	50
Figura 32 - Pormenor cobertura plana exterior - 1 (s/escala).....	50
Figura 33 - Pormenor cobertura plana exterior - 2 (s/escala).....	51

Figura 34 - Pontos singulares das soluções construtivas - adaptado de [34].....	51
Figura 35 - Sobreposição de alçados da fachada Nordeste e Sudoeste	54
Figura 36 - Sobreposição de alçados da fachada Nordeste	54
Figura 37 - Planta de arquitectura de definição da envolvente do modelo	60
Figura 38 - Geometria do modelo	61
Figura 39 - Divisão vãos envidraçados da orientação Sudoeste.....	62
Figura 40 - Divisão das zonas térmicas do edifício.....	63
Figura 41 - Unidade compacta – certificada pela <i>Passive House</i>	65
Figura 42 - Identificação dos envidraçados oscilo-batentes.....	67
Figura 43 - Zonas convexas e não convexas [28]	69
Figura 44 - Algumas soluções de sombreamento pré-analisadas.....	70
Figura 45 - Esquema resumo dos estudos paramétricos.....	74
Figura 46 - Valores recomendados da T_{oc} em função T_{mp} período de Verão – adaptado de [42]78	
Figura 47 - Valores recomendados da T_{oc} em função T_{mp} período de Inverno – adaptado de [43]	79
Figura 48 - Valores das necessidades de aquecimento do edifício original ($Setpoint = 20^{\circ}C$) ...	81
Figura 49 - Valores das necessidades de arrefecimento do edifício original ($Setpoint = 26^{\circ}C$) .	81
Figura 50 - Variação da temperatura anual do caso de estudo original.....	82
Figura 51 - Variação da temperatura durante a estação de aquecimento do caso de estudo original de 14/12 a 28/12.....	83
Figura 52 - Distribuição cumulativa da temperatura durante a estação de aquecimento	84
Figura 53 - Distribuição da temperatura interior durante a estação de aquecimento	85
Figura 54 - Variação da temperatura durante a estação de arrefecimento do caso de estudo original de 25/8 a 8/9.....	86
Figura 55 - Distribuição cumulativa da temperatura durante a estação de arrefecimento	86
Figura 56 - Distribuição da temperatura interior durante a estação de arrefecimento	87
Figura 57 - Variação da temperatura anual do caso de estudo original com sistema HVAC	88
Figura 58 - Variação da temperatura durante a estação de aquecimento e arrefecimento do edifício original com sistema HVAC	88
Figura 59 - Necessidades energéticas do edifício original com sistema HVAC	89
Figura 60 - Análise do conforto segundo EN15251 [43] para a estação de aquecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M1-S13.....	92
Figura 61 - Análise de conforto segundo EN15251 [43] para a estação de aquecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M1-S21	93
Figura 62 - Análise de conforto segundo EN15251 [42] para a estação de aquecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M2 -S13.....	94

Figura 63 - Percentagem de desconforto para a estação de aquecimento, entre a) EN 15251 [43] e b) limite inferior de 20°C.....	95
Figura 64 - Percentagem de desconforto para a estação de aquecimento medida em graus hora, entre os modelos M1-S6, M1-S13 e M1-S21	95
Figura 65 - Análise de conforto segundo EN15251 [43] para a estação de arrefecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M1-S13.....	96
Figura 66 - Análise de conforto segundo EN15251 [43] para a estação de arrefecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M2-S13.....	97
Figura 67 - Análise de conforto segundo EN15251 [43] para a estação de arrefecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M3-S13.....	98
Figura 68 - Percentagem de desconforto para a estação de arrefecimento, entre a) EN 15251 [43] e b) limite superior de 26°C.....	99
Figura 69 - Percentagem de desconforto para a estação de arrefecimento medida em graus hora, entre os modelos M1-S6, M1-S13, M2-S13 e M3-S13	99
Figura 70 - Necessidades energéticas do modelo original e dos otimizados	100
Figura 71 - Influência da utilização de sistemas de protecção solar manual e automática	102
Figura 72 - Influência do aumento da inércia térmica na temperatura interior do quarto individual do 1º Andar	104
Figura 73 - Representação das regiões escolhidas no mapa de Portugal	105
Figura 74 - Variação da temperatura exterior para as regiões de Aveiro, Bragança, Évora e Faro	106
Figura 75 - Necessidades energéticas para a região de Aveiro	108
Figura 76 - Necessidades energéticas para a região de Bragança	109
Figura 77 - Necessidades energéticas para a região de Évora.....	109
Figura 78 - Necessidades energéticas para a região de Faro	110
Figura 79 - Análise de desconforto para os limites 20 e 26°C para a região de Aveiro	111
Figura 80 - Análise de desconforto para os limites 20 e 26°C para a região de Bragança	112
Figura 81 - Análise de desconforto para os limites 20 e 26°C para a região de Évora	112
Figura 82 - Análise de desconforto para os limites 20 e 26°C para a região de Faro.....	113
Figura 83 - Os melhores modelos para as diferentes regiões de Portugal.....	114
Figura 84 - Distribuição da temperatura interior durante a estação de arrefecimento	115

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros do Ficheiro Climático do INETI	38
Tabela 2 - Propriedades geométricas do edifício	45
Tabela 3 - Relação percentual entre superfícies opacas e translúcidas	45
Tabela 4 - Coeficientes de transmissão térmica dos vãos de porta e janela	52
Tabela 5 - Coeficientes de transmissão térmica e factor solar dos envidraçados	53
Tabela 6 - Propriedades das réguas do sistema de protecção solar	53
Tabela 7 - Efeito da consideração das pontes térmicas na fachada exterior.....	55
Tabela 8 - Erro associado à área do modelo.....	61
Tabela 9 - Propriedades Termofísicas dos materiais.....	63
Tabela 10 - Caudais de insuflação/extracção (0.6 rph^{-1}) por zona térmica	66
Tabela 11 - Área de abertura por janela	68
Tabela 12 - Estimativa do consumo energético associado aos equipamentos, iluminação e AQS	68
Tabela 13 - Resultados do estudo de sensibilidade	71
Tabela 14 - Horário de funcionamento dos sistemas de protecção solar	72
Tabela 15 - Descrição das categorias de conforto especificadas - adaptado de [43].....	78
Tabela 16 - Largura de banda por categoria de conforto - adaptado de [43]	78
Tabela 17 - Valores de temperaturas de projecto segundo a Norma EN 15251 - adaptado de [43]	79
Tabela 18 - Modelos representativos para avaliar a estação de aquecimento	90
Tabela 19 - Modelos representativos para avaliar a estação de arrefecimento	91
Tabela 20 - Horários de Funcionamento dos Sistemas de Fecho das Persianas Exteriores	101
Tabela 21 - Valores da taxa de sobreaquecimento do edifício para cada hipótese de activação da protecção solar	102
Tabela 22 - Influência da redução da temperatura de fecho do sistema automático de protecção solar	103
Tabela 23 - Influência do aumento da inércia térmica na taxa de sobreaquecimento	104
Tabela 24 - Resumo das curvas de temperatura das quatro regiões escolhidas	106
Tabela 25 - Estimativa do consumo dos equipamentos, iluminação e AQS para Bragança, Évora e Faro.....	107

Capítulo 1

Introdução

Capítulo 1 - Introdução

1.1 - Enquadramento Geral

1.2 - Objetivos

1.3 - Organização e Estrutura da Dissertação

Capítulo 1 - Introdução

1.1 - Enquadramento Geral

A energia é atualmente um ativo dispendioso no custo direto da sua produção/obtenção e nos reflexos igualmente importantes que o seu consumo apresenta em termos ambientais. Na União Europeia, os edifícios, são responsáveis por cerca de 40% da energia consumida. A construção é um setor em evolução, quer na quantidade de área edificada para os mais diversos fins: Habitação, Comércio, Indústria e Serviços, quer na complexidade técnica crescente, com o objetivo de melhorar a sua eficácia a vários níveis, nomeadamente o energético. Este facto constitui uma resposta evidente à tendência atual para o aumento de consumo de energia. A redução do consumo e a aposta na utilização de energias renováveis são estratégias fundamentais para diminuir a dependência energética, bem como das emissões de gases que contribuem para o efeito de estufa global. A implementação destas medidas deverá contribuir para que a União Europeia cumpra o protocolo de Quioto e a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, com objetivo de manter o aumento da temperatura global abaixo dos 2°C e reduzir até 2020 a emissão de gases em pelo menos 20% abaixo dos níveis de 1990 ou 30% no caso de se pretender alcançar um acordo internacional [1].

Atualmente as alterações climáticas constituem uma realidade incontornável sendo previsível que venham a ter um impacto bastante significativo em Portugal Continental e nas Regiões Autónomas [2].

Segundo a Diretiva ao Desempenho Energético de Edifícios (EPBD) 2010/31/EU, a partir de dia 31 de Dezembro de 2020, todos os edifícios deverão ser do tipo *nearly zero energy buildings*, edifícios com elevada performance energética, ou seja, com reduzidas necessidades de consumo energético. A quantidade de energia necessária deverá ser obtida através de fontes renováveis, produzida no local ou na proximidade. O objetivo desta diretiva é melhorar o desempenho energético dos edifícios da União Europeia, com base nos requisitos climáticos interiores, na relação custo/eficiência e na sua influência nas alterações climáticas [1].

O Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) realizou recentemente um estudo, em parceria com o Instituto Dom Luiz da Universidade de Lisboa, onde foram efetuadas simulações distintas relativamente à evolução da temperatura do ar e da precipitação até ao final do século, com objetivo de integrar o Quinto Relatório do Painel Intergovernamental para as alterações climáticas (IPCC) da ONU.

Neste estudo foram considerados dois cenários distintos:

- i. Em que se assume que deverão ser cumpridos os objetivos estabelecidos à União Europeia em reduzir a emissão de dióxido de carbono em 20% até 2020, e o aumento de 20% do peso da energia renovável relativamente a 1990 (RCP4.5);
- ii. Em que se representa o crescimento contínuo das emissões durante o século XXI (RCP8.5).

Na Figura 1 é apresentada a estimativa da evolução do aumento da temperatura para ambos os cenários descritos:

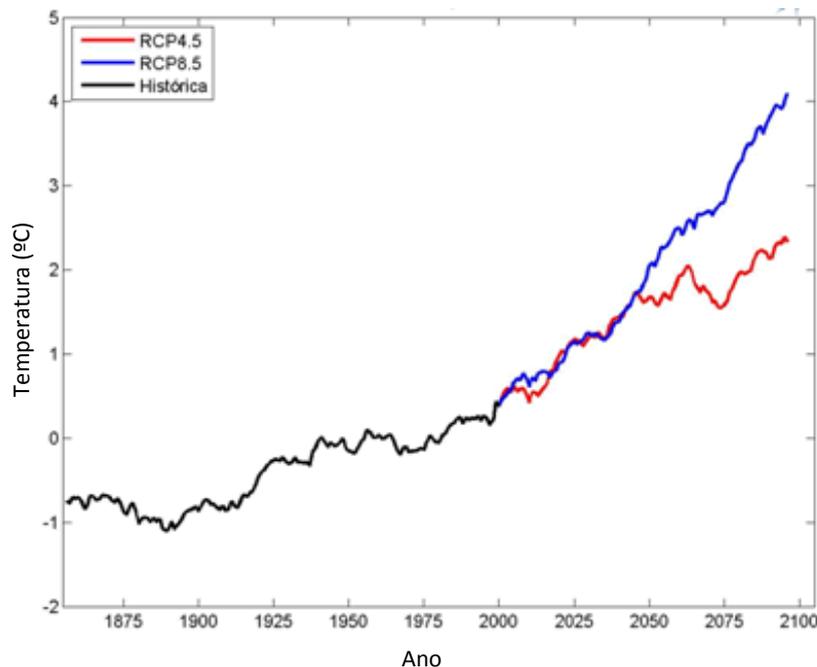


Figura 1 – Simulação da variação da temperatura média do ar até ao final do século - adaptada de [2]

Através dos dados obtidos, ver Figura 1, verifica-se que a evolução da temperatura nos dois cenários é bastante semelhante durante a primeira metade do século XXI. No entanto, na segunda metade, nota-se uma diferença nessa evolução que se acentua até ao final do mesmo período, ainda que se cumpra o estabelecido na norma Europeia, prevê-se uma evolução média dos valores da temperatura do ar, em cerca de 1,5°C [2].

Com o conceito *Passive House*, para além de se cumprirem as exigências Europeias no sentido dos edifícios se caracterizarem por um baixo consumo energético a partir de 2020, será possível reduzir drasticamente o consumo global dos mesmos com a consequente e desejável redução de emissões. Com as alterações climáticas previstas e com a subida do custo da energia, torna-se incontornável o facto que o conceito *Passive*

House aliado à exploração de energias renováveis constituirá uma importante base para a obtenção de edifícios do tipo *net zero-energy buildings* (NZEB's).

1.2 - Objetivos

O desenvolvimento da presente dissertação pretende contribuir para a implementação do conceito *Passive House* em Portugal. Através da realização de um estudo detalhado para a região de Aveiro, recorrendo-se à simulação dinâmica nomeadamente ao programa *EnergyPlus*. Esse estudo terá por base a utilização do projecto de arquitectura de um edifício existente com o objectivo de passar a cumprir os requisitos da norma *Passive House*.

Será caracterizado o seu desempenho térmico previsto sem qualquer tipo de optimização, com a utilização de um sistema de ventilação comum, e determinadas as suas necessidades energéticas. Serão também avaliadas as condições de conforto térmico dos ocupantes. Com base nos resultados obtidos, a partir desse projeto, serão realizados estudos de sensibilidade para um conjunto de modelos de simulação, com a finalidade de otimizar o caso de estudo referência, para que passe a cumprir os requisitos *Passive House*.

Numa fase posterior, será estudado o comportamento térmico de 5 cenários distintos para 4 regiões geográficas, representativas do território nacional para posterior avaliação do conforto térmico e necessidades energéticas. Pretende-se desta forma compreender qual a influência das diferenças climáticas das regiões escolhidas no comportamento interior do edifício e verificar se este continua a cumprir os requisitos *Passive House*.

Realizar-se-ão também estudos complementares para as diferentes variáveis escolhidas para o estudo de sensibilidade, como a perspectiva comportamental dos utilizadores/residentes na influência do conforto térmico de espaços.

1.3 - Organização e Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos:

O Capítulo 1 enquadra a dissertação desenvolvida e define os principais objectivos da mesma.

O Capítulo 2 e o Capítulo 3 abordam o estado de arte do tema da dissertação. Estabelece-se uma síntese do conhecimento nos seus domínios específicos. Em primeiro lugar é apresentado um enquadramento onde é retratado o conceito *Passive House* e a

sua origem. Depois são descritos os requisitos energéticos e de conforto necessários, e ainda, de forma detalhada os cinco princípios básicos que o definem. Por fim, é explicado o conceito de simulação dinâmica, as suas principais aplicações e os principais programas de cálculo. É também realizada uma descrição do programa *EnergyPlus* e explicada de forma sucinta a sua metodologia de cálculo, por ter sido o programa escolhido para o desenvolvimento das simulações.

O Capítulo 4 descreve o caso de estudo. Em primeiro lugar é caracterizada a zona climática de Aveiro. Seguidamente é descrita a tipologia construtiva e são caracterizadas as propriedades termofísicas das soluções construtivas do edifício.

O Capítulo 5 descreve o estudo de simulação do comportamento térmico, em regime dinâmico, do edifício. É descrito o procedimento de construção do modelo geométrico utilizado e são caracterizados todos os parâmetros necessários ao seu desenvolvimento. Neste capítulo é também descrito o estudo de sensibilidade desenvolvido para um conjunto de cenários de simulação numérica que traduzem estratégias de otimização do conceito *Passive House* para a região de Aveiro.

O Capítulo 6 descreve os resultados obtidos nos modelos desenvolvidos no Capítulo 5. É estudado o comportamento térmico interior do edifício, avaliado o seu conforto de três formas distintas, e são determinadas as necessidades energéticas associadas.

O Capítulo 7 resume as principais conclusões da dissertação e aborda-se o desenvolvimento futuro de trabalhos complementares neste domínio de investigação.

Capítulo 2

Passive House

Capítulo 2 - *Passive House*

2.1 - Enquadramento

2.2 - Requisitos Térmicos *Passive House*

2.3 - Princípios Básicos

2.3.1 - Isolamento Térmico

2.3.2 - Janelas Eficientes

2.3.3 - Sistema de Ventilação com Recuperação de Calor

2.3.4 - Estanquidade

2.3.5 - Correção e Minimização de Pontes Térmicas

Capítulo 2 - *Passive House*

2.1 - Enquadramento

O período de exploração de combustíveis fósseis baratos que perdura há mais de um século, poderá estar próximo do fim. Durante esses anos foi criada uma nova classe de profissionais, engenheiros mecânicos, com o objetivo de especificar sistemas ativos para diferentes tipologias de edifícios. A ideia era obter um interior mecanicamente climatizado para que a fachada deixasse de ser o principal moderador da temperatura interior dos edifícios. No entanto, na sequência das crises do petróleo de 1973 verificou-se a necessidade de reduzir a dependência deste tipo de recursos finito. Iniciou-se então um longo processo de desenvolvimento de soluções energéticas alternativas. No contexto da construção tornaram-se necessárias soluções capazes de rentabilizar o consumo de energia, dando-se início ao desenvolvimento de estudos com o objectivo de modelar as condições interiores dos edifícios de acordo com as estações do ano através de desenho de projeto. A solução passa então pela redescoberta dos princípios de controlo ambiental através da manipulação da forma do edifício, dimensão e disposição de vãos e o desempenho térmico dos materiais: o designado desenho passivo.

O desenho passivo é uma abordagem geral aberta a diferentes tipos de interpretações consoante a localização e o tipo de clima, com o objetivo de minimizar o consumo energético de combustíveis fósseis, utilizados no aquecimento, ventilação, iluminação e arrefecimento [3].

Com base nesta ideia de desenho passivo, surgiu o conceito *Passive House* em 1988, desenvolvido durante um período de pesquisa na universidade de *Lund*, Suécia, pela autoria de *Bo Adamson* e *Wolfgang Feist* do *Institut fur Wohnen*.

Em 1991, como resultado de um projeto elaborado por um grupo de cientistas liderados por *Wolfgang Feist*, foi concluída a elaboração de um edifício experimental em *Darmstadt-Kranichstein*, no centro da Alemanha (ver Figura 2). Esta construção foi o resultado do estudo teórico-prático sobre eficiência energética de edifícios. Foram testadas várias técnicas de optimização como: a utilização de envidraçados triplos com uma maior percentagem de área orientada a Sul com o objetivo de tirar um maior partido dos ganhos solares; camadas de isolamento de espessuras consideráveis com valores de coeficientes de transmissão térmica entre 0,1 e 0,15 W/m².°C, que aplicados de forma inteligente minimizam o efeito de pontes térmicas; elevado grau de impermeabilidade com valores de n₅₀ de 0,22 h⁻¹ e a utilização de um sistema de

climatização com recuperação de calor e geotermia (aproveitamento da temperatura do solo para aquecimento/arrefecimento do ar interior) [4].



Figura 2 - Primeira *Passive House* em Damstadt-Kranichstein – adaptado de [4]

Este empreendimento, constituído por quatro habitações (por solicitação de quatro clientes privados), deu origem à primeira sociedade de desenvolvimento de *Passive Houses*. As casas foram desenhadas pelos arquitetos *P.Bott*, *P.Ridder* e *P.Westermeyer* com uma área de 156 m² cada uma. Para obter os requisitos térmicos pretendidos a nível energético, foram desenvolvidas diversas componentes no edifício, algumas já utilizadas com sucesso em edifícios de baixo consumo [5].

Ao longo dos anos foi efetuada uma monitorização de forma a demonstrar o grau de satisfação e os requisitos energéticos:

- Aquecimento: 11,9 [kWh/m²a];
- Água quente doméstica: 6,1 [kWh/m²a];
- Gás para cozinhar: 2,6 [kWh/m²a];
- Energia necessária para iluminação e electrodomésticos: 11,2 [kWh/m²a].

Para além dos excelentes valores de eficiência energética verificados, a aceitabilidade e satisfação dos utilizadores foi elevada tanto no verão como no inverno.

Demonstrou-se que este tipo de construção não necessita de sistemas comuns de aquecimento, no entanto, a ventilação mecânica com recuperação de calor tornou-se indispensável para atingir valores de energia abaixo de 20 kWh/m²a no clima da Alemanha [4].

Estas considerações sustentam o novo conceito, o conceito *Passive House* que é definido como: “um edifício, cujo conforto térmico (ISO 7730) pode ser atingido apenas com aquecimento ou arrefecimento da massa de ar fresco que é necessária para se atingir a qualidade de ar interior necessária – sem necessidade de recirculação de ar adicional” [6].

2.2 - Requisitos Térmicos *Passive House*

Através deste conceito é possível atingir um ambiente interior confortável no inverno e no verão, com baixos consumos de energia. Para isso é necessário um maior nível de exigência de projeto e execução da obra. As *Passive Houses* devem ser certificadas por entidades como a *PassivHaus Institute*, por forma a cumprir um conjunto de exigências energéticas:

- O valor máximo da necessidade energética para aquecimento não pode ultrapassar os 15 [kWh/m².a];
- O valor máximo da necessidade energética para arrefecimento não pode ultrapassar os 15 [kWh/m².a];
- A carga máxima de aquecimento/arrefecimento é limitada a um valor máximo de 10 [W/m²];
- O valor máximo de energia primária necessária, incluindo os equipamentos elétricos, não poderá ultrapassar o valor máximo de 120 [kWh/m².a];
- O resultado do teste de pressurização à envolvente do edifício deverá apresentar resultados ao teste n_{50} inferiores a 0,6 [rph⁻¹];
- A percentagem de sobreaquecimento relativo ao número de horas referentes à estação de arrefecimento deverá ser inferior a 10%.

Os valores acima mencionados são indicativos para a Europa central, mais precisamente para a Alemanha. O cálculo deverá ser realizado através de um programa designado por *Passive House Planning Package* (PHPP) [7].

Posteriormente, o projeto *Passive-On*, estudou o conceito *Passive House* para o Sul da Europa, tendo em conta as alterações climáticas, propondo algumas alterações:

- O teste de pressurização à envolvente do edifício deverá apresentar resultados ao teste n_{50} , segundo a norma EN 13820, inferiores a 0,6 [rph⁻¹], caso a qualidade do ar interior e o conforto térmico sejam obtidos através de um sistema mecânico de ventilação. (Em locais com condições de projeto com temperaturas

superiores a 0°C o teste de pressurização com um valor limite de 1,0 [rph⁻¹] é normalmente suficiente para atingir o aquecimento pretendido);

- Durante as estações quentes a temperatura dentro do edifício deverá permanecer numa gama de valores de conforto estabelecido na EN 15251. A temperatura deverá manter-se abaixo dos 26°C, caso exista um sistema de arrefecimento ativo [3].

2.3 - Princípios Básicos

O conceito *Passive House* é líder mundial na implementação da eficácia energética dos edifícios. Inicialmente resumiu-se à construção de edifícios residenciais na Europa Central. Atualmente, pode ser aplicado a todo o tipo de edificadros, independentemente da região de implantação. A procura desta solução tem vindo a aumentar consideravelmente [8].

Existem cinco princípios básicos que definem um edifício do tipo *Passive House* e que o tornam energeticamente tão eficiente (ver Figura 3) [8]:

1. Isolamento térmico;
2. Janelas Eficientes;
3. Sistemas de ventilação com recuperação de calor;
4. Estanquidade;
5. Correção de pontes térmicas.

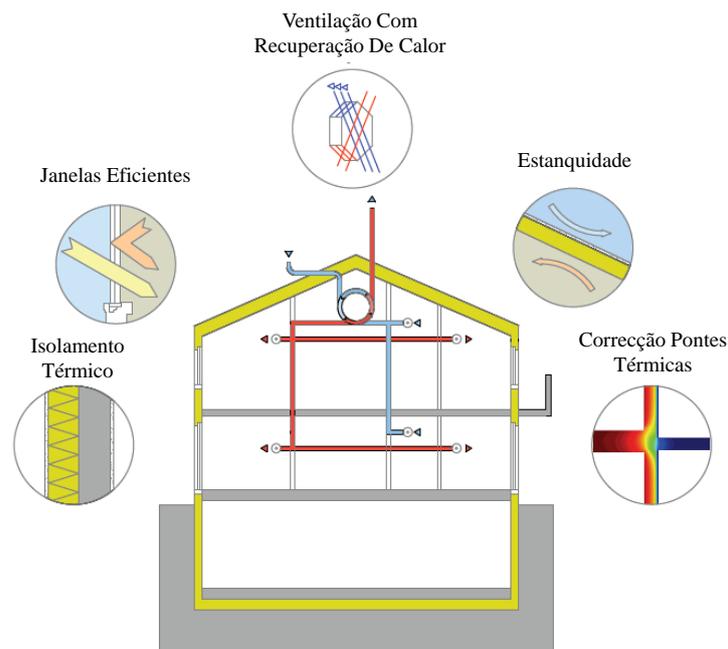


Figura 3 - Princípios básicos de uma *Passive House* – adaptado de [9]

2.3.1 - Isolamento Térmico

Durante as estações frias a temperatura no interior de um edifício é geralmente bastante superior à temperatura do ar exterior. A tendência natural é que devido a esse diferencial, existam perdas de energia através da envolvente. É estimado que a envolvente opaca vertical exterior e a cobertura, sejam responsáveis por 70% dessas perdas, devido à quantidade de área que ocupam. É fundamental ter em consideração a utilização de espessuras de isolamento adequadas e correctamente aplicadas [8].

O isolamento térmico tem como objetivo reduzir as perdas de energia, para que os ganhos internos e solares sejam capazes de gerar um sistema de aquecimento que aliado aos restantes princípios *Passive House* não seja necessário um elevado consumo de energia para se atingir a zona de conforto térmico interior. A gama de temperaturas interiores deverá variar entre os 20 e os 26°C. São aconselhados valores de U entre 0,10 e 0,15 W/m².°C para a Europa Central em todas as soluções construtivas da envolvente opaca vertical exterior [10].

O isolamento deverá também ser aplicado de forma a proteger o edifício das condições atmosféricas, fazendo com que permaneça quente e seco, reduzindo consequentemente problemas de humidade interna e ainda aumentando a sua durabilidade [8].

Através da termografia (ver Figura 4), é possível compreender a diferença do comportamento térmico de um edifício convencional (o da esquerda), com o de uma *Passive House* (o da direita). Os tons avermelhados representam fugas de calor pela fachada. Torna-se evidente que o edifício da direita tem uma capacidade bastante superior ao da esquerda em reter o calor [11].



Figura 4 - Termografia de duas vivendas – retirado de [11]

Através deste princípio é possível poupar energia e preservar o edifício. Foi provado que a diferença de investimento de uma construção do tipo *Passive House* comparativamente a um edifício *standard* é compensada a longo prazo através da poupança de energia [8].

2.3.2 - Janelas Eficientes

A escolha do tipo de janela influencia bastante o comportamento térmico de um edifício. Estes elementos constituem um ponto fraco a nível de protecção térmica da envolvente exterior, dado que apresentam um valor de U mais elevado comparativamente às restantes soluções construtivas. Em climas mais frios, janelas mal isoladas, proporcionam superfícies frias na fachada que sem o auxílio de sistemas de aquecimento activos, estarão sujeitas a fenómenos de condensação interior. Segundo a normativa Europeia de energia, o coeficiente de condutibilidade térmica de janelas de *Passive Houses* deverá ser inferior a $0,80 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$, para que se consigam obter temperaturas superiores a 17°C junto à sua superfície.

Como exemplo documentado na Figura 5, todas as superfícies da solução adotada para esta fachada como a caixilharia e os vidros encontram-se a uma temperatura acima dos 17°C , ainda que se verifique uma temperatura exterior de -5°C [8].



Figura 5 - Imagem de infravermelhos do interior de uma janela de uma *Passive House* – retirado de [8]

As janelas deverão fornecer um balanço de energia positivo mesmo nas estações frias. Como tal, uma característica muito importante é o factor solar (g) do vidro, que define a quantidade de energia por eles admitida para dentro do edifício. São aconselháveis valores altos próximos de 0,5 [8].

Na Europa central, uma janela que cumpra as exigências *Passive House* reduz as perdas de calor em cerca 50% comparativamente a uma janela *standard*. Esta nova geração de janelas com um elevado nível de qualidade, apresenta quatro características importantes [8]:

1. Na Europa central: vidro triplo, vidro de baixa emissividade ou equivalente (para países mais quentes nomeadamente Sul da Europa vidros duplos poderão ser suficientes);
2. Espaçadores (material e geometria; no cálculo da condutibilidade térmica de um envidraçado existe um coeficiente que tem em consideração a ponte térmica linear dos espaçadores);
3. Caixilharia bem isolada (é comum a sobreposição do isolamento sobre o caixilho de forma a reduzir perdas de energia);
4. Instalação otimizada na parede (existe um coeficiente extra que entra na expressão do coeficiente de transmissão térmica relacionado com o processo de instalação das janelas que tem em consideração a ponte térmica linear entre a caixilharia e a parede).

A disposição e localização das janelas são fundamentais numa *Passive House*. Para se atingir uma melhor performance de recolha de energia solar, a fachada com maior percentagem de área translúcida deverá estar orientada a sul, para edifícios localizados no hemisfério norte. Caso as janelas tenham uma orientação marcada a este e oeste, existirá o risco de ganhos excessivos durante as estações quentes; ou orientação marcada a norte, perdas significativas nas estações frias. As janelas orientadas a Sul, deverão ser controladas com soluções de sombreamento para evitar ganhos solares elevados nas estações mais quentes [12].

O modo de utilização e proteção destes elementos em países com temperaturas médias consideráveis é igualmente importante. Nas estações mais quentes a abertura das janelas durante o período noturno e um eficaz sombreamento das mesmas nas fachadas sul e oeste, ajuda a manter uma temperatura interna de conforto, fazendo poupar 8 a 20% da energia gasta em arrefecimento [13].

2.3.3 - Sistema de Ventilação com Recuperação de Calor

O conforto e a saúde são dois aspetos fundamentais para os ocupantes de um edifício. Segundo o modelo de *Fanger's* de 1972, as condições de conforto interiores são

definidas pela temperatura e velocidade do ar, temperatura radiante média, humidade relativa, tipo de roupa dos ocupantes e respetivas atividades. A zona de conforto é atingida com temperaturas do ar interior compreendidas entre os 20 e os 26°C e valores de humidade relativa entre os 30 e os 60% [13].

Para que se consiga obter uma boa qualidade de ar interior, requisito importantíssimo nas *Passive Houses*, é necessário renová-lo, com o recurso a técnicas de ventilação. No entanto, em alturas como estações as frias, a opção por ventilação natural provocaria elevadas perdas térmicas, sendo por isso necessário recorrer a sistemas de ventilação mecânica [8].

O recurso a sistemas de ventilação mecânica só é viável se for garantida a estanquidade completa do edifício. É fundamental que não exista circulação de ar entre o interior e o exterior quer pela existência de fissuras na fachada quer pela utilização de caixilharias de reduzida qualidade. Caso contrário, existirão grandes perdas de energia e tornar-se-á bastante difícil controlar os caudais de renovação de ar pretendidos. É essencial que a movimentação do ar no interior do edifício seja 100% controlada pelo sistema mecânico de ventilação, facilitando assim o controlo das temperaturas interiores e qualidade do ar pretendida [11].

Existem sistemas de ventilação mecânica que aliados os princípios básicos já referidos para as *Passive Houses*, são capazes de garantir simultaneamente o conforto térmico e salubridade do ar com um baixíssimo consumo de energia. Designam-se de sistemas de ventilação de ar com recuperação de calor. Estes sistemas são constituídos por uma unidade de ventilação, um sistema de controlo, um recuperador de calor - permutador e filtros (ver Figura 6).

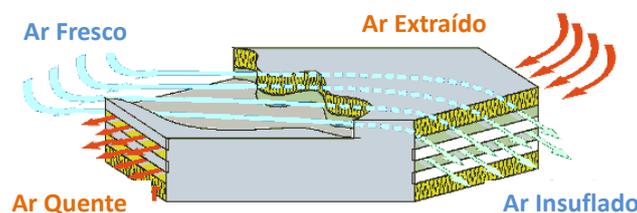


Figura 6 - Permutador de calor - adaptado de [8]

O princípio de funcionamento de um permutador de fluxos cruzados baseia-se no facto de a energia calorífica contida no ar extraído ser aproveitada para o aquecimento do ar insuflado, sem que os fluxos se cruzem. O ar que entra no permutador vindo do exterior é pré aquecido acabando por atingir a temperatura de conforto interior de 20°C através

dos ganhos internos ou no caso de países mais frios (Centro e Norte da Europa) recorrendo-se ao auxílio de sistemas de aquecimento de baixíssimo consumo energético. Atualmente é tecnicamente possível a obtenção de sistemas com uma taxa de 75 a 90% de recuperação de calor [8].



Figura 7 – Esquema de insuflação/extracção de ar de uma *Passive House* – adaptada de [8]

Como se pode visualizar na Figura 7, a exaustão do ar deverá ser realizada na cozinha, casas de banho e espaços com níveis de poluição e humidade elevada, e insuflado nos quartos, sala e escritórios e espaços funcionais. O hall e o vão de escadas por exemplo, são classificados como zonas de transferência de ar. A quantidade de ar renovado que entra deve ser controlada para que se obtenham bons níveis de conforto e saúde.

Os sistemas convencionais de renovação de ar possuem um elevado custo e perdas de energia. Esses sistemas implicam um elevado consumo energético para que se atinga um ambiente interior equilibrado, não sendo por isso aplicáveis a esta tipologia construtiva [8].

2.3.4 - Estanquidade

É comum considerar que as pequenas falhas no isolamento de uma construção auxiliam e melhoram a renovação de ar, no entanto, existem uma série de razões que demonstram que a estanquidade de um edifício é fundamental, nomeadamente numa *Passive House*:

- O caudal de ventilação poderá não ser suficiente para a renovação de ar interior;
- O volume de ar que atravessa as falhas depende de fatores que não são constantes, como a pressão do vento na fachada e as variações de temperatura interior e exterior;

- Quanto maior o diferencial de temperatura interior e exterior, maior será o caudal de ar e conseqüentemente maiores serão as perdas térmicas;
- Entrada de água, em dias de vento e chuvas fortes.

Assim, não é correto confiar a ventilação de um edifício à permeabilidade da sua fachada, muito menos numa *Passive House*. A circulação de ar deve ser controlada por um sistema de ventilação mecânica, uma vez que a existência de fugas para o exterior origina um desequilíbrio no balanço térmico [11].

Outro problema que merece ser considerado é o risco de condensação nas falhas do isolamento, este fenómeno pode contribuir para a degradação acelerada do edifício.

Para se atingir uma perfeita estanquidade do edifício, é utilizada uma metodologia denominada *Red Pencil Method* como se pode visualizar na Figura 8:

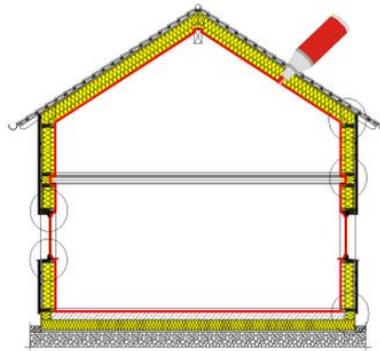


Figura 8 - Isolamento *Red Pencil Method* – retirado de [8]

O princípio deste método consiste na obtenção de um isolamento contínuo, sem interrupções. A sua eficácia depende do correcto planeamento de execução, para que seja possível adaptar diferentes técnicas e soluções construtivas.

O nível de estanquidade de um edifício é avaliado através de um teste de pressurização denominado de *blower door test* (ver Figura 9).

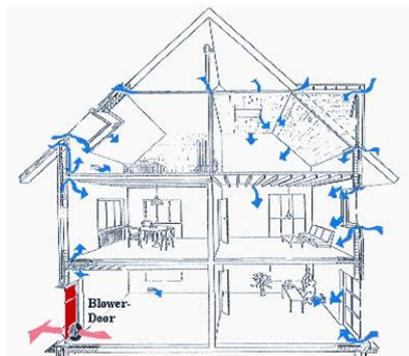


Figura 9 – *Blower Door Test* – retirado de [14]

Trata-se de um dispositivo construído numa abertura de acesso, como uma porta por exemplo, e que cria sucção no interior do edifício. A taxa de renovação de ar não poderá ultrapassar as $0,6 \text{ rph}^{-1}$ a uma diferença de pressão de 50 Pa entre o interior e o exterior. Este teste é realizado em diversas aberturas do edifício a fim de determinar a taxa de fugas a ele associado. Trata-se de um teste fundamental numa *Passive House* [8].

2.3.5 - Correção e Minimização de Pontes Térmicas

Pontes térmicas são elementos da envolvente de um edifício (janelas, cunhais, juntas) onde existe uma acentuada variação na resistência térmica, dando origem a um aumento do fluxo de calor multidimensional (ver Figura 10). Têm uma elevada influência na performance energética, já que aumentam as perdas de calor no inverno e os ganhos no verão.

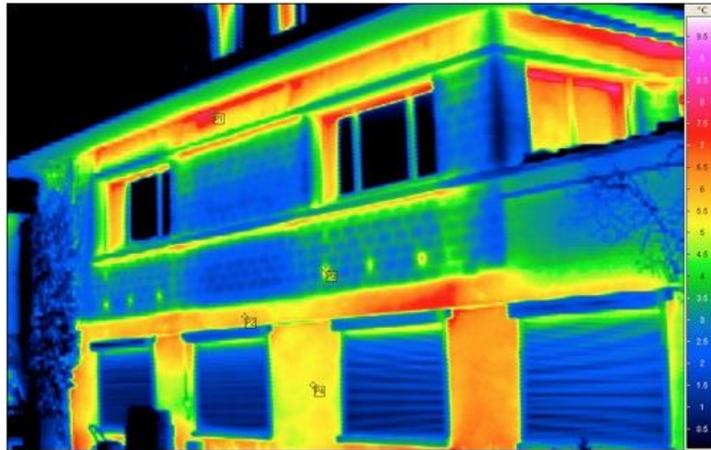


Figura 10 - Pontes térmicas de um edifício – retirado de [15]

Durante as estações quentes, a temperatura à superfície de uma ponte térmica é inferior à dos elementos adjacentes. Essa diferença no gradiente de temperatura poderá provocar a formação de condensações e crescimento de fungos [16].

Para cumprir as exigências *Passive House*, é fundamental que as perdas associadas às pontes térmicas sejam inferiores a $0,01 \text{ W/mK}$. Para além da correcta escolha e colocação do isolamento térmico, existe um factor importantíssimo que deve ser tido em conta, o factor de forma. Esse factor relaciona a área do edifício com o seu volume. Quanto mais regular for a forma do edifício menos pontes térmicas existirão e menores serão os cuidados necessários para minimizar o seu efeito [8].

Existem dois tipos de pontes térmicas importantes:

- Lineares: encontram-se na união de dois ou mais elementos de um edifício (união de uma parede com o piso por exemplo);
- Pontuais: quando uma parede é perfurada por um elemento com elevado nível de condutividade térmica [16].

O efeito das pontes térmicas é tanto maior quanto maior for a quantidade de isolamento utilizada na fachada de um edifício. Devido à dimensão das perdas associadas a este fenómeno é necessário incluí-lo no estudo da performance energética dos edifícios e na qualidade de temperatura interior [17].

Esta avaliação pode ser feita de duas maneiras:

- Através de ensaios normalizados em dois elementos idênticos de uma construção, um com ponte térmica e outro sem. Estes ensaios estão limitados ao tipo de elemento em estudo, não apresentam grande precisão, são morosos, dispendiosos, justificando-se apenas para projetos importantes ou para verificar os valores retirados do cálculo por simulação;
- Através de métodos numéricos. Existem diversos programas que permitem o cálculo do efeito das pontes térmicas nas fachadas, no entanto, requerem grandes cuidados na definição das condições de contorno dos elementos [16].

Para evitar/minimizar o efeito das pontes térmicas é utilizada uma metodologia designada de *thermal bridge free design* (ver Figura 11). O isolamento deverá ser dimensionado para que seja possível, utilizando um lápis, traçar uma camada de isolamento mínima contínua em toda a fachada exterior, sem interrupções.

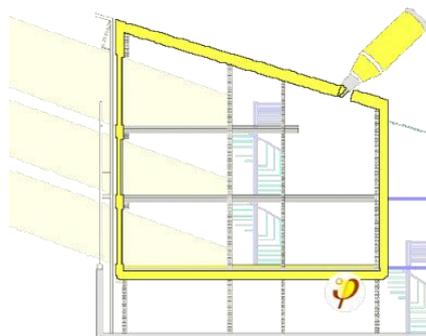


Figura 11 - *Thermal Bridge Free Design* – retirado de [8]

O objetivo deste princípio é melhorar o detalhe do planeamento das pontes térmicas de forma a otimizar o comportamento térmico do edifício [8].

Capítulo 3

Simulação Dinâmica

Capítulo 3 - Simulação Dinâmica

3.1 - Enquadramento

3.2 - Aplicações da Simulação Dinâmica em Edifícios

3.3 - Programas de Cálculo de Simulação Dinâmica

3.3.1 - Enquadramento

3.3.2 - *EnergyPlus*: Programa Escolhido

3.3.3 - Aplicações do Programa *EnergyPlus*

3.3.4 - Cálculo Do Balanço Térmico no Programa *EnergyPlus*

Capítulo 3 - Simulação Dinâmica

3.1 - Enquadramento

As necessidades energéticas dos edifícios não dependem apenas do desempenho individual dos elementos da fachada exterior (paredes, envidraçados e cobertura), sistemas de climatização ou sistemas de iluminação, dependem também do seu desempenho integrado. Os edifícios são constituídos por um conjunto de interações que ocorrem de forma dinâmica dependendo da sua ocupação. Quanto mais complexos forem os edifícios, maior é a sua complexidade em termos de modelação numérica e maior é a quantidade de dados necessários para os descrever e simular [18].

A simulação computacional está em permanente evolução, sendo atualmente aplicada em diversas áreas da engenharia. A evolução tecnológica permitiu um rápido avanço no processo e metodologia de cálculo da performance térmica e das necessidades energéticas dos edifícios. Com o desenvolvimento deste tipo de programas, pretende-se estudar as implicações em termos energéticos e de conforto de um edifício condicionado às decisões de concepção [19].

Para a realização deste tipo de estudos, é necessário compreender o significado de modelação: capacidade de desenvolver um modelo capaz de representar um sistema complexo (geometria 3D, características térmicas construtivas, características de eventuais sistemas de climatização/ativos e de ventilação e características das condições de ocupação) (ver Figura 12). A simulação pode ser baseada em dois tipos de modelos: físicos (à escala reduzida ou à escala real) ou numéricos (computacionais).



Figura 12 – Modelação numérica de um edifício – retirado de [20]

A simulação dinâmica tornou-se indispensável na engenharia sendo utilizadas na fase de projeto dos edifícios (geometria e constituição) e na sua operação [21].

3.2 - Aplicações da Simulação Dinâmica em Edifícios

Atualmente o uso da simulação na área de eficiência energética e conforto térmico já é considerado algo comum. Existe um enorme grupo de áreas de aplicação [22]:

- Cálculo de necessidades de aquecimento/arrefecimento dos edifícios: a determinação de perfis de carga de aquecimento/arrefecimento e valores de pico são a base para a escolha de equipamentos, sistemas e traçados de ventilação;
- Análise do desempenho energético para elaboração de projetos e reabilitação: ao conhecer as necessidades energéticas de um edifício, incluindo o consumo dos equipamentos instalados, é possível projetá-lo de forma a ser energeticamente eficiente. É também possível obter um orçamento energético de modo a facilitar o planeamento e a gestão de energia.
- Sistema de gestão e controlo de energia: destina-se a monitorizar, controlar e reportar as operações dos sistemas do edifício de forma a assegurar a eficiência e o conforto térmico dentro do mesmo. Inclui estratégias como o controlo da entalpia, determinação e implementação do tipo de configurações para o período noturno e sistema de programação horária para funcionar apenas em períodos específicos.
- Fazer cumprir a regulamentação e as normas relativas à construção: a simulação de edifícios poderá auxiliar o dimensionamento de forma a cumprir os requisitos legais. Poderá servir também para completar auditorias energéticas na verificação da performance energética do edifício.
- Análises de custo: alguns programas têm capacidade de obter análises de custo, sendo possível desta forma apresentar ao projectista soluções mais económicas.
- Estudar opções de economia de energia passiva: a simulação de edifícios pode ser utilizada para estudar técnicas de poupança de energia, como soluções de sombreamento, iluminação natural, geotermia, ventilação noturna, energia eólica, isolamentos móveis, coberturas reflectoras e verdes, entre muitas outras soluções de armazenamento de energia.
- Computational fluid dynamics (CFD): é amplamente utilizada no estudo do aquecimento global, microclimas, climas urbanos, sistemas de ventilação de edifícios, qualidade de ar interior e extração de poluentes. A sua utilização tem-se manifestado crescente, devido às novas normas sobre saúde e conforto dos

edifícios e devido à necessidade de criar espaços internos e sistemas de climatização que cumpram os critérios dessas normas.

A simulação dinâmica é assim uma ferramenta essencial para a realização de estudos paramétricos. Esta metodologia, comparativamente à dos modelos à escala real, tem como vantagem efetuar um maior número de testes, com experiências integralmente reproduzíveis, cujos resultados se caracterizam por uma precisão e credibilidade elevada uma vez calibrados com registos reais [4].

3.3 - Programas de Cálculo de Simulação Dinâmica

3.3.1 - Enquadramento

Ao longo dos últimos cinquenta anos, têm sido criados e desenvolvidos inúmeros programas de simulação energética de edifícios, no âmbito de obter informações relativamente a indicadores de performance de necessidades energéticas, temperatura, humidade e custos de construção e manutenção [23].

Os programas mais utilizados atualmente são:

O *Trnsys (Transient System Simulation Program)* trata-se de um programa de simulação energética cujo sistema modular torna-o uma das ferramentas mais flexíveis disponíveis. Inclui uma interface gráfica, um mecanismo de simulação e uma biblioteca que abrange diversos componentes do edifício como sistemas de climatização com base em energias renováveis e tecnologias emergentes, existindo também a possibilidade de introdução de novos componentes que não existam no pacote *standard*. O mecanismo de simulação é geralmente utilizado para análise de sistemas de climatização, análise de multifluxos de ar, simulação de necessidades de energia elétrica, projetos que incluam a utilização de elementos de ganho solar, performance energética de edifícios, entre outros.

O *ESP-r* é um programa que sustenta uma avaliação específica dos fatores que influenciam o desempenho energético e ambiental dos edifícios. Possibilita ao utilizador explorar as complexas relações entre as formas dos edifícios, fluxos de ar, configurações em planta e sistemas de controlo. É um programa baseado num volume finito, em que a abordagem de um problema (especificado em termos de geometria, construção, operação, etc) transforma-se num conjunto de equações de conservação (para a energia, massa) que são integrados em sucessivos espaços de tempo em resposta

ao clima, ocupantes e influência de sistema de controlo. Este programa dispõe de um centro de gestão de projeto em torno do qual estão dispostas as bases de dados de apoio, um simulador e várias ferramentas de avaliação de desempenho. Existe a possibilidade de exportar modelos para o programa *EnergyPlus* com materiais, construções e superfícies (com algumas limitações), passando geralmente no analisador sem grandes problemas.

O programa *DesignBuilder* possui um ambiente de modelação de fácil utilização onde é possível trabalhar e alterar os modelos dos edifícios. Fornece uma série de dados de desempenho ambiental como o consumo de energia, dados relativos ao conforto interno e dimensão de sistemas de climatização. O *output* do programa é baseado na simulação sub-horária detalhada através do *EnergyPlus*. O *DesignBuilder* pode ser utilizado para simulações de várias estratégias de climatização, edifícios ventilados naturalmente, edifícios controlados por iluminação natural, fachadas duplas, estratégias avançadas de proteção solar, etc [24].

O programa *Ecotect Analysis* é uma ferramenta de análise de sustentabilidade de projeto da *Autodesk*. Abrange diversas funcionalidades de simulação e análise de energia capazes de melhorar o desempenho dos edifícios já existentes e otimizar projetos de edifícios novos. Com este programa é possível calcular o consumo de energia e emissões de carbono com base num modelo de um edifício com bastante precisão (análises anuais, mensais, diárias ou até horarias), utilizando para isso uma base de dados global de informação meteorológica; determinar qual a quantidade de energia necessária para o aquecimento/arrefecimento de um modelo de um edifício, bem como o efeito de ocupação, ganhos internos, infiltrações e equipamentos; estimar a quantidade de água utilizada no interior e exterior do edifício. Permite ainda a análise do efeito da radiação solar nas janelas do edifício a qualquer altura do dia; calcular os fatores de luz do dia e níveis de iluminação nas superfícies em qualquer ponto do modelo; compreender a posição do sol relativamente ao modelo em qualquer data, tempo ou localização de forma a dimensionar soluções de sombreamento [25].

3.3.2 - *EnergyPlus*: Programa Selecionado

Durante cerca vinte anos o governo dos Estados Unidos da América contribuiu para o desenvolvimento de dois programas de simulação energética o *DOE-2* e o *BLAST*. O *BLAST* foi apoiado pelo departamento da defesa e o *DOE-2* pelo departamento da

energia. A grande diferença entre os dois programas baseia-se na metodologia de cálculo do valor das cargas energéticas.

As metodologias de simulação utilizadas são bastante complexas uma vez que foram desenvolvidas cumulativamente durante muito tempo e por diversos autores. Para alterar estes programas, seria necessário um forte investimento financeiro com prazos incomportáveis. Assim, em 1995 o departamento da defesa deixou de patrocinar o desenvolvimento do programa *BLAST* e devido às restrições orçamentais, optou-se por combinar os recursos e as equipas e as melhores capacidades dos dois programas. Assim o *EnergyPlus* tornou-se um programa completamente novo baseado nos recursos e capacidades mais eficazes de cada um dos outros dois programas acima referidos. É composto por uma nova linha de código escrita em *Fortran 90*, não possuindo interface de trabalho integrada de pré e pós-processamento como se visualiza Figura 13 [26].

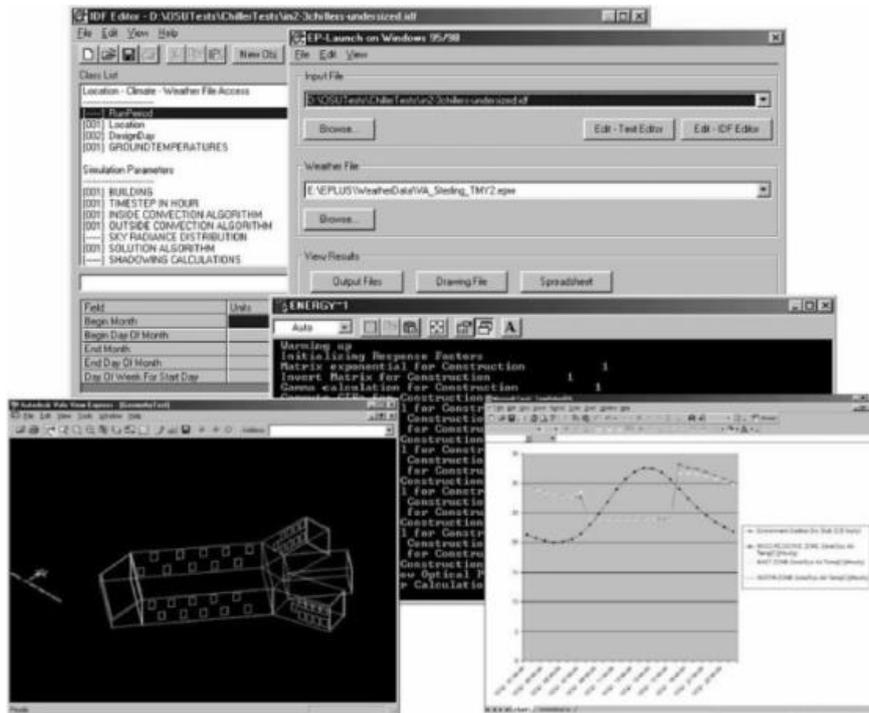


Figura 13 - Imagens de utilitários e resultados do programa *EnergyPlus* – retirado de [26]

3.3.3 - Aplicações do Programa *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é um programa de análise energética e simulação de carga térmica de edifícios. Calcula a necessidade de aquecimento/arrefecimento consoante os valores de temperatura interiores definidos, condições através da utilização de sistemas de climatização e consumo de energia de equipamentos primários. A simulação integrada

destes conceitos permite que através do programa seja possível obter condições idênticas a um edifício real [24].

De uma forma sucinta apresentam-se algumas das capacidades chave do programa *EnergyPlus* [24]:

- Cálculo de soluções simultâneas integradas onde a resposta do edifício e os sistemas primários e secundários estão interligados;
- Definição de intervalos de tempo específicos na interação entre os diferentes elementos térmicos e a envolvente, sendo possível a opção por intervalos inferiores à unidade horária;
- Estudo de soluções de equilíbrio de calor para determinar cargas térmicas que permitem o cálculo simultâneo de efeitos de radiação e convecção, tanto na superfície interior como na exterior. Este processo poderá ser realizado para qualquer altura do intervalo de tempo escolhido.
- Determinação da condução de calor entre elementos de um edifício como paredes, coberturas, pisos, etc;
- Criação de modelos de conforto térmico baseados na atividade interior, produção de humidade, sistemas de iluminação utilizados, etc;
- Criação do modelo anisotrópico do céu que permite melhorar o cálculo da energia solar difusa em superfícies inclinadas;
- Cálculos avançados/detalhados em aberturas de paredes de edifícios, como janelas com sistemas de proteção solar, balanços térmicos entre camadas permitindo estudar a quantidade de energia absorvida pelos vidros das janelas e uma base de dados com o desempenho de inúmeras janelas existentes no mercado;
- Controlo da iluminação natural, inclui o cálculo de sistemas de iluminação interiores e o efeito da redução da iluminação artificial no aquecimento e arrefecimento do edifício;
- Cálculo da poluição atmosférica que prevê a emissão de partículas em suspensão e produção de hidrocarbonetos.
- Estudar soluções da envolvente que incorporem materiais de mudança de fase.

3.3.4 - Cálculo Do Balanço Térmico no Programa *EnergyPlus*

O programa *EnergyPlus*, superou os seus antecedentes, pela sua capacidade de integrar um conjunto de aspectos relacionados com simulação energética de edifícios: cargas térmicas, elementos de produção de energia térmica e sistemas de ventilação e ar novo. Através da simulação integrada, é possível o cálculo de todas estas variáveis [27].

Na Figura 14, é ilustrada a forma como todos os elementos de uma simulação se interligam. Existem cinco “gestores” principais capazes de organizar todo o funcionamento de uma simulação: gestor de simulação, gestor de solução integrada, gestor do balanço de energia de superfícies, gestor do balanço de energia do ar e o gestor de simulação de sistemas do edifício. O módulo do balanço térmico de superfícies é o responsável pelo balanço de energia considerando os fenómenos de condução, convecção, radiação e transferência de massa. O módulo do balanço de massa tem em conta a carga térmica do ar em cada zona sempre que há ventilação (ar de exaustão e infiltrações) e avalia os ganhos térmicos por convecção. O gestor de simulação dos sistemas do edifício estabelece a ligação entre os módulos de balanço térmico acima referidos e os diversos sistemas de condicionamento do ar, como unidades de aquecimento, unidades de arrefecimento, bombas, ventiladores e outro tipo de equipamentos [27].

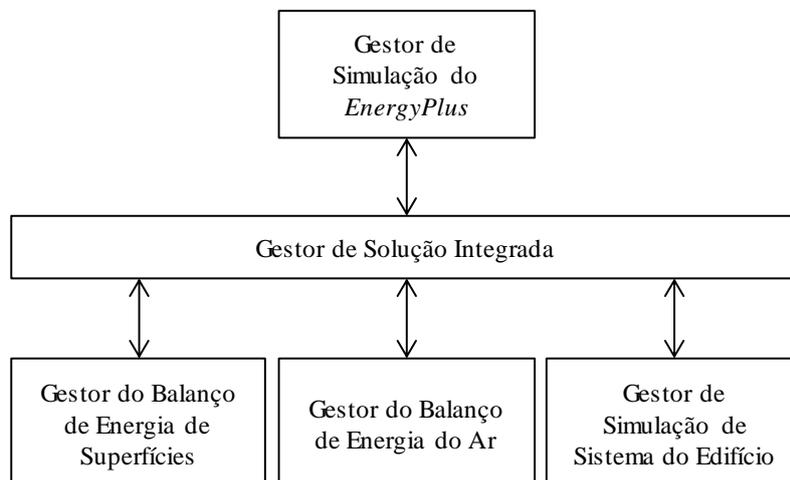


Figura 14 - Esquema do programa *EnergyPlus* adaptado de [27]

O *EnergyPlus* baseia-se no estudo do balanço térmico que envolve dois cálculos distintos: o cálculo do balanço térmico interior à zona térmica considerada e o cálculo do balanço térmico superficial.

Assume-se que a massa térmica do ar no interior de cada zona se encontra perfeitamente homogeneizada a uma temperatura uniforme. São consideradas as seguintes simplificações relacionadas com as superfícies dos elementos construtivos envolventes a cada zona térmica do edifício [27]:

- A temperatura superficial das superfícies pertencentes a cada zona térmica apresenta um valor uniforme;
- A radiação de onda longa e curta emitida apresenta um valor uniforme;
- Existe troca de radiação difusa entre as diversas superfícies;
- O fluxo de calor por condução que atravessa os elementos de construção é unidirecional e perpendicular à superfície do elemento.

De forma breve, apresenta-se o algoritmo e as equações fundamentais do balanço térmico interior.

Cálculo do Balanço Térmico Interior

Para calcular a temperatura do ar interior o *EnergyPlus* baseia-se na expressão 1, que inclui a variação da energia armazenada pelo ar.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (1)$$

Onde:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$: Energia total armazenada no ar interior da zona térmica [W];

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$: Somatório dos ganhos internos por convecção [W];

$\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$: Transferência de calor por convecção à superfície dos elementos da zona térmica [W];

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$: Transferência de calor por convecção das superfícies existentes na zona [J/s];

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$: Transferência de calor devido à infiltração de ar exterior [J/m².s];

\dot{Q}_{sys} : Transferência de calor através de sistemas de climatização [W];

h_i : Condutância térmica superficial [W/m².°C];

A_i : Área da superfície i [m²];

T_{si} : Temperatura da superfície i [°C];

T_z : Temperatura do ar na zona térmica [°C];

\dot{m} : Fluxo de massa [kg/m².s];

T_∞ : Temperatura do ar exterior [°C];

C_p : Calor específico [J/kg.°C];

T_{zi} : Temperatura do ar na zona térmica i [°C].

Desprezando o calor específico do ar, a expressão de balanço térmico em regime permanente passa a poder exprimir-se pela expressão 2:

$$-Q_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z) \quad (2)$$

Os sistemas de ventilação fornecem ar quente ou ar frio a cada zona do edifício de forma a atender as cargas de aquecimento ou refrigeração necessárias. A energia fornecida a cada zona pelo sistema, \dot{Q}_{sys} , é dada pela diferença entre a entalpia do ar insuflado e a entalpia do ar extraído, de acordo com a expressão 3:

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (3)$$

A expressão 4 assume que a taxa de fluxo de massa de ar insuflado em cada zona é exatamente igual à taxa de fluxo de ar extraído. Substituindo a expressão 3 na expressão 1, obtêm-se a expressão seguinte:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z) + \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (4)$$

O somatório das cargas térmicas de cada zona e a energia fornecida pelo sistema de ventilação igualam-se à variação de energia armazenada no ar dessa mesma zona. Para calcular o termo diferencial referente à temperatura da zona, substituindo o termo transiente, pode ser utilizada uma aproximação por diferenças finitas segundo a expressão 5:

$$\frac{dT_z}{dt} = (\delta t)^{-1} (T_z^{-1} - T_z^{t-\delta t}) + O(\delta t) \quad (5)$$

Todos os termos que contêm a temperatura média do ar na zona T_z , foram isolados do lado esquerdo da expressão e os restantes não conhecidos foram afetados por um

desfasamento temporal de $(t - \delta t)$ e colocados do lado direito da expressão. Como resultado desta manipulação obtêm-se a expressão 6:

$$C_z \frac{T_z^t - T_z^{t-\delta t}}{\delta t} + T_z^t \left(\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p \right) = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i^t + \dot{m}_{sys} C_p T_{supply}^t + \left(\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right)^{t-\delta t} \quad (6)$$

Finalmente passando a parcela da temperatura afectada pelo *step* temporal para o lado direito da expressão. Isolando o termo T_z obtêm-se a expressão 7:

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i^t + \dot{m}_{sys} C_p T_{supply}^t + \left(C_z \frac{T_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right)^{t-\delta t}}{\frac{C_z}{\delta t} + \left(\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{sys} C_p \right)} \quad (7)$$

A expressão 7 é a expressão base do programa que permite estimar a temperatura do ar numa determinada zona térmica de estudo. Posteriormente foram desenvolvidas expressões de ordem superior, para que a expressão não fosse limitada pelo *timestep* de análise, acelerando-se assim o processo de cálculo.

Balanco Térmico Superficial

É possível definir o modo como a transferências de calor e teor em humidade influenciam o cálculo da *performance* das superfícies de um edifício [28].

No cálculo do balanço térmico superficial o programa *Energyplus* disponibiliza três algoritmos de cálculo distintos: *Conduction Transfer Function* (CTF), *Effective Moisture Penetration Depth* (EMPD) e o *Combined Heat and Moisture Transfer* (HAMT):

O algoritmo de cálculo CTF avalia a transferência de calor sensível, em regime transitário, sem contabilizar o armazenamento e a difusão de vapor que ocorre através dos elementos de construção [27];

O algoritmo de cálculo EMPD considera que existe uma fina camada próxima da superfície interior dos elementos de construção que de uma forma dinâmica, efectua trocas de vapor de água com o ar interior. Torna-se necessário o preenchimento das propriedades do material pertencente a essa camada, no campo designando : *MaterialProperty:MoisturePenetraionDepth:Settings* [28];

O algoritmo de cálculo HAMT tem por base a transferência e o armazenamento de humidade e calor através dos materiais que constituem os elementos de construção. Dos

três algoritmos, disponíveis é o mais complexo, já que necessita de uma caracterização cuidada e completa de todas as camadas e materiais que compõem as soluções construtivas. Os campos a preencher para a definição destas propriedades são:

MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Settings;

MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Settings;

MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:SorptionIsotherm;

MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Suction;

MaterialProperty:HeatAnMoistureTransfer:Redistribution;

MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Diffusion;

MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:ThermalConductivity [28].

Considerou-se para o algoritmo de balanço térmico superficial a metodologia de cálculo mais simples, *ConductionTransferFunction* (CTF). Este algoritmo avalia a transferência de calor sensível, em regime transiente, sem contabilizar o armazenamento e a difusão de vapor que ocorre através dos elementos de construção. Optou-se por desprezar o efeito da humidade nos modelos.

Capítulo 4

Descrição do Caso de Estudo

Capítulo 4 - Descrição do Caso de Estudo

4.1 - Zona Climática

4.1.1 - Enquadramento

4.1.2 - Ficheiro de Dados Climáticos

4.1.3 - Caracterização do Clima na Região de Aveiro

4.2 - Caracterização do Caso de Estudo

4.2.1 - Implantação do Edifício

4.2.2 - Geometria e Factor de Forma

4.3 - Caracterização da Envolvente Exterior do Edifício

4.3.1 - Soluções Construtivas e Propriedades Térmicas

4.3.2 - Soluções Construtivas da Envolvente

4.3.2.1 - Laje de Piso Térreo

4.3.2.2 - Paredes Exteriores

4.3.2.3 - Pavimento Intermédio

4.3.2.4 - Cobertura Plana

4.3.2.5 - Vãos - Portas e Envidraçados

4.3.3 - Efeito das Pontes Térmicas na Envolvente Exterior

Capítulo 4 - Descrição do Caso de Estudo

4.1 - Zona Climática

4.1.1 - Enquadramento

O edifício – caso de estudo iniciou a sua construção à 6 meses - pertence a um conjunto de lotes cuja área de implantação se localiza em Oliveirinha, freguesia portuguesa pertencente ao concelho de Aveiro a uma latitude de $40,60^\circ$ e longitude de $-8,60^\circ$ (ver Figura 15).

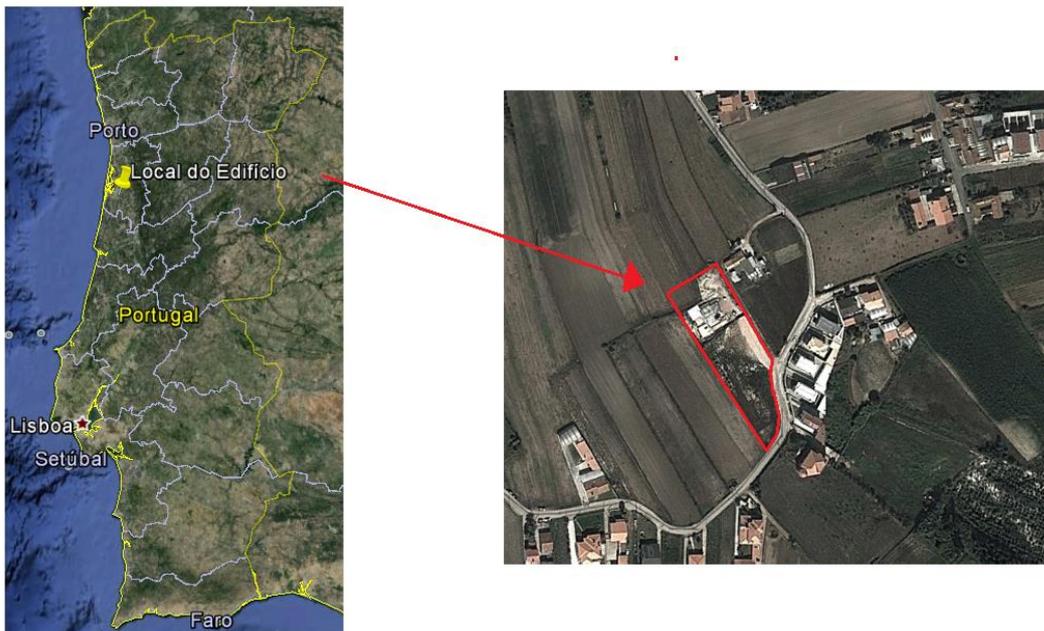


Figura 15 - Localização do edifício (*GoogleEarth*)

O edifício encontra-se na faixa litoral do país, já que, a sua distância à costa é inferior a 50 quilómetros. Tendo em conta esse aspecto e a sua área envolvente (bastante desflorestada) é importante ter em consideração o efeito da acção do vento na sua análise.

Para determinar de forma precisa a altura a que o terreno se encontra foi utilizada uma ferramenta disponibilizada pelo programa *GoogleEarth* designada por perfis de elevação [29]. Foi traçada uma recta ao longo do ponto médio do terreno e posteriormente verificada a altitude ponto a ponto concluindo que se mantêm constante nos 50 metros de altura, (ver Figura 16).



Figura 16 - Perfis de altitude (GoogleEarth)

4.1.2 - Ficheiro de Dados Climáticos

Para efeitos de cálculo, o trabalho tem por base a utilização de um ficheiro climático retirado do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (INETI) para a região de Aveiro. Os parâmetros apresentados na Tabela 1, resultam da média dos valores mais representativos de um período de medições de 29 anos (entre 1961 e 1990) [30]. Existem três campos sem informação, um relativo à precipitação e outro relativo à velocidade e rumo do vento.

Tabela 1 - Parâmetros do Ficheiro Climático do INETI

Parâmetros Disponibilizados	
Temperatura [°C]	Humidade Relativa [%]
Nebulosidade Total e Opaca [0 a 10 limpo a coberto]	Radiação solar – global horizontal e difusa horizontal [W/m ²]
Radiação Solar – global vertical para cada orientação (N,NW,W,etc) [W/m ²]	Radiação IV – celeste descendente [W/m ²]
Iluminância – global horizontal, difusa horizontal e directa normal [lux]	Luminância zenital [Cd/m ²]
Parâmetros Sem Informação	
Precipitação [mm]	Vento – velocidade [m/s*10] e rumo [0° a 360°]

Para determinar os parâmetros relativos à velocidade do vento e o respectivo rumo, recorreu-se à informação da monitorização realizada pelo departamento de Engenharia Física da Universidade de Aveiro. Não tendo acesso os dados relativos ao período anual completo, procedeu-se ao tratamento dos valores apenas para a estação de arrefecimento que segundo o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

(REH) [32], vai de Junho a Setembro. Foi necessário um tratamento de dados cuidado e crítico, já que o ficheiro climático do INETI apresenta os valores em escala de tempo horária, enquanto que os dados da estação da Universidade de Aveiro foram recolhidos em intervalos de 10 em 10 minutos. Foi feita a média para a grandeza de velocidade do vento e a moda, selecção do valor mais frequente ou repetitivo de uma matriz de dados, consoante o rumo do vento.

Através dos resultados obtidos no tratamento de dados verificou-se que durante o período de arrefecimento a velocidade máxima ronda os 3,3 m/s, para as orientações de NNO, NO, ENE como se visualiza na Figura 17. Através da Figura 18, conclui-se também que existe uma grande predominância de incidência do vento no quadrante Noroeste.

Sendo muito complicado trabalhar com este tipo de variáveis de forma exacta, com os dados disponíveis e tendo em consideração a geometria exterior do edifício, é possível compreender de uma forma simples a importância da consideração da acção do vento no comportamento do mesmo. Estes parâmetros são necessários para a simulação da eficácia da abertura de janelas no comportamento térmico do edifício em estudo, pelo princípio de ventilação natural.

Deste modo a localização do edifício é propícia à realização de *free cooling*, que consiste na diminuição da temperatura do ar interior de um edifício a partir da temperatura do ar exterior (quando este se encontra mais fresco), sem que seja necessário desta forma recorrer a um sistema de ventilação mecânica [33].

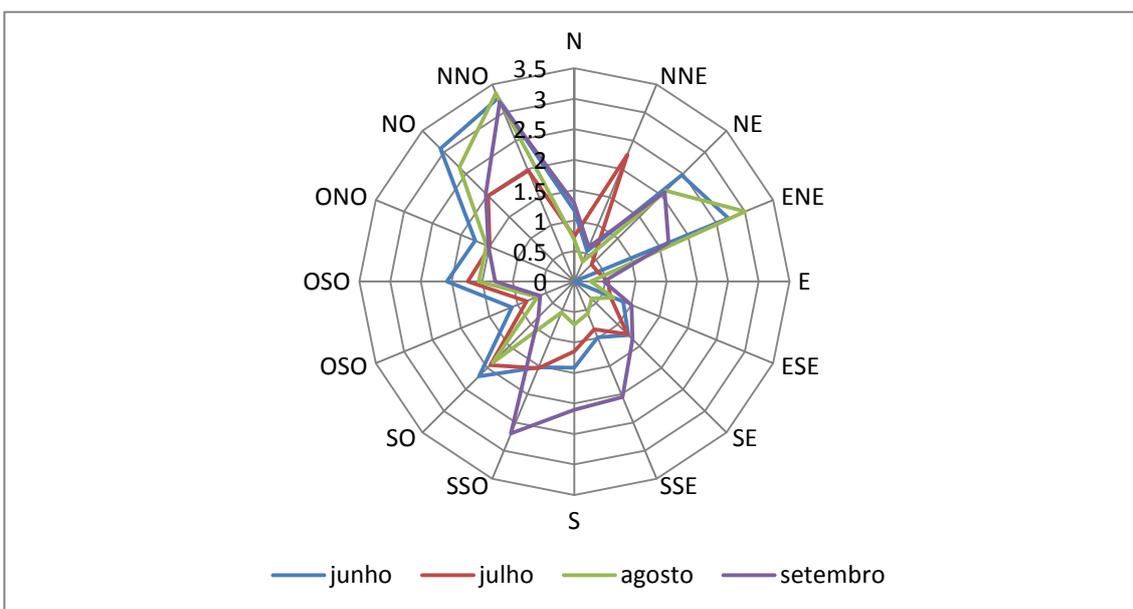


Figura 17 - Velocidade média mensal do vento (m/s) por orientação

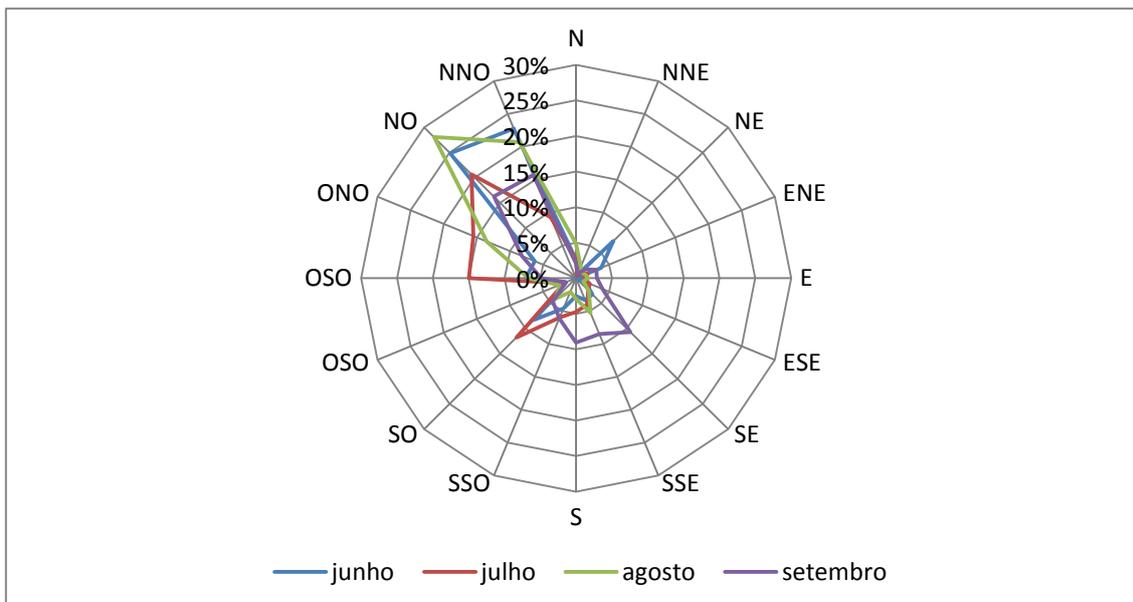


Figura 18 - Frequência de incidência do vento por orientação

4.1.3 - Caracterização do Clima na Região de Aveiro

Com base no sistema internacional de classificação climática de Köppen, que tem por base os valores mensais e anuais da temperatura média diária do ar e precipitação, Aveiro localiza-se na região (Csb). É considerada nessa região a existência de um clima temperado, com um Inverno chuvoso, um Verão seco e com uma temperatura média do ar no mês mais quente de 22°C. Relativamente às estações do ano são bem caracterizadas, com um período de Verão quente, um período de Inverno frio e com a estação de Primavera normalmente mais fria que a estação de Outono [34].

Na Figura 19 é apresentada a média das temperaturas diárias para a região de Aveiro e na Figura 20 é apresentada a média da radiação solar horizontal por metro quadrado. Os valores apresentados resultam do tratamento de dados provenientes do ficheiro climático do INETI. Como esperado os períodos de radiação máxima correspondem aos meses de Maio, Junho, Julho e Agosto. Durante estes quatro meses a radiação média máxima diária atinge um valor de 750 W/m². Para os meses mais frios, Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro, a radiação média mínima ronda o valor de 350 W/m². Este tipo de valores permite ter uma ideia da importância da consideração do efeito radiação solar no dimensionamento de edifícios nesta região. Pensar numa fase inicial de projecto na necessidade de implementar elementos de sombreamento e no tipo de soluções construtivas a adoptar.

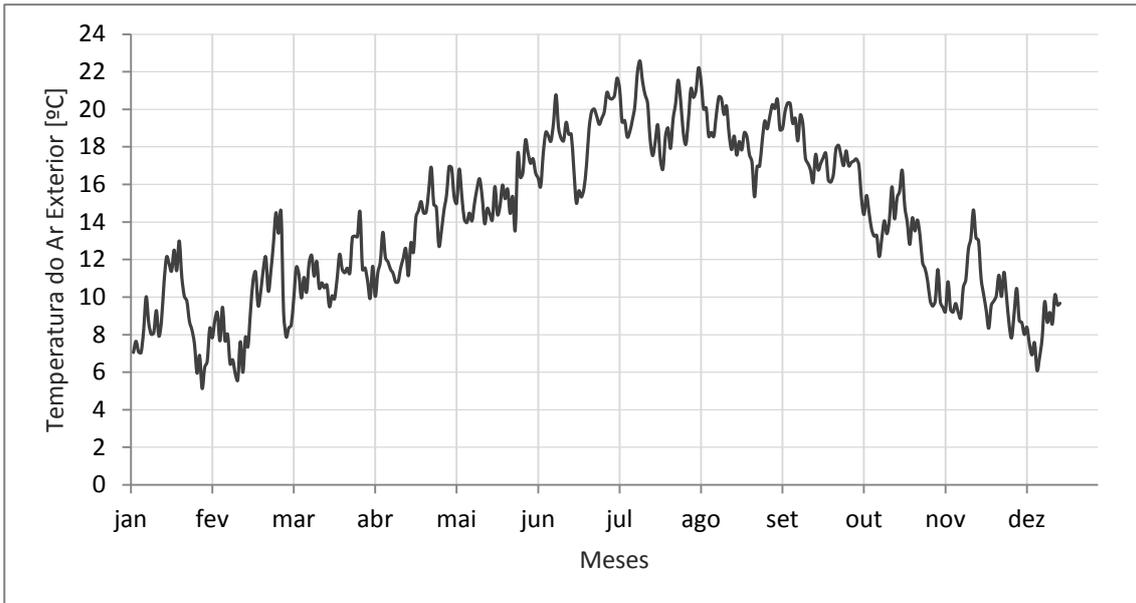


Figura 19 - Média diária da temperatura exterior em Aveiro entre 1961 e 1990

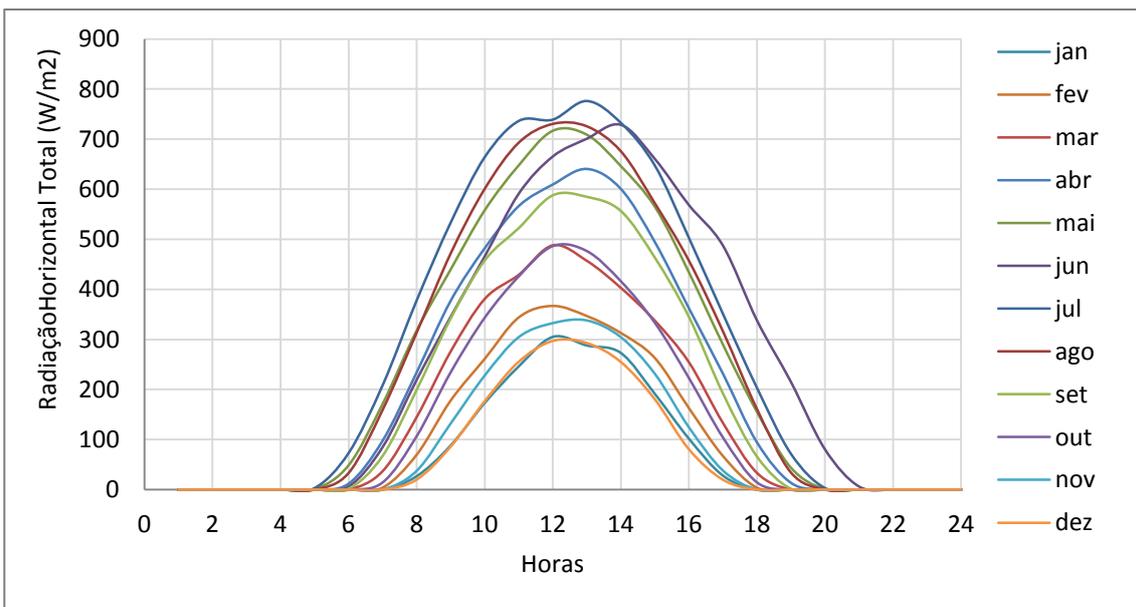


Figura 20 - Média horária da radiação solar horizontal mensal em Aveiro

Com base no tratamento dos dados provenientes do ficheiro climático do INETI, pela análise da Figura 21, que representa a probabilidade cumulativa da temperatura exterior, concluiu-se que a temperatura anual mínima em Aveiro é de aproximadamente 5°C e a máxima 23°C. Em 50% do ano, a temperatura média diária é superior a 14°C.

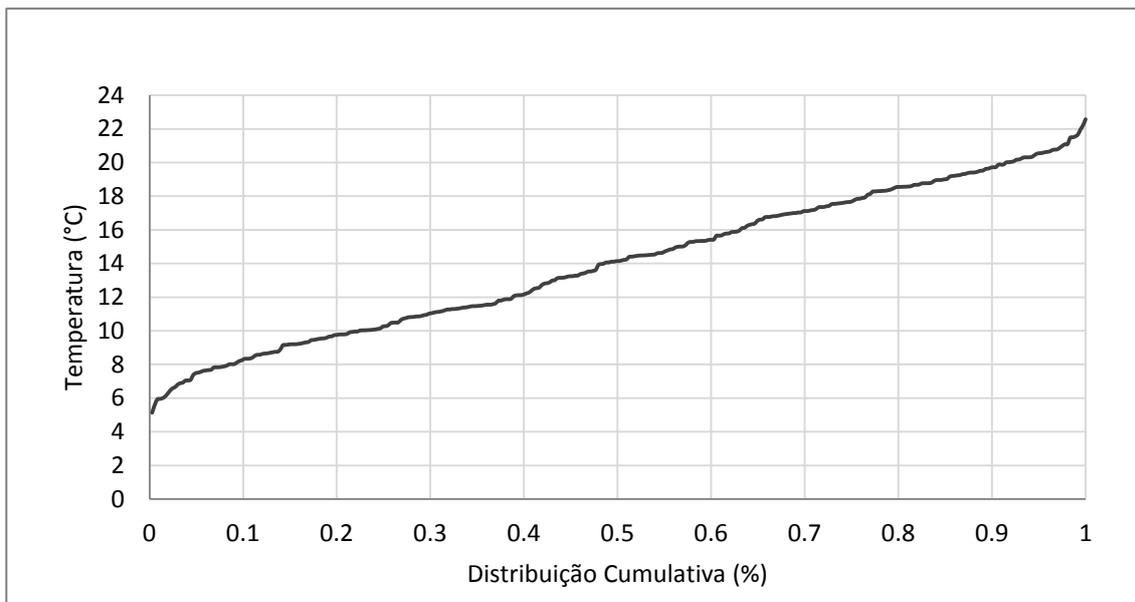


Figura 21 - Probabilidade cumulativa da temperatura exterior em Aveiro

4.2 - Caracterização do Caso de Estudo

4.2.1 - Implantação do Edifício

O edifício de estudo situa-se como já foi referido em Oliveirinha, freguesia portuguesa pertencente ao concelho de Aveiro. A habitação faz parte de uma pequena urbanização de 8 lotes, de tipologia semelhante, edifícios de habitação com 2 pisos, r/c e 1º andar. Na Figura 22 é possível observar a posição da habitação em estudo, assinalada a vermelho, relativamente às restantes sete que fazem parte do empreendimento. Os primeiros sete lotes terão um sistema construtivo semelhante, no entanto, o lote assinalado a vermelho, será alvo de estudos de optimização para os requisitos de uma *Passive House*.



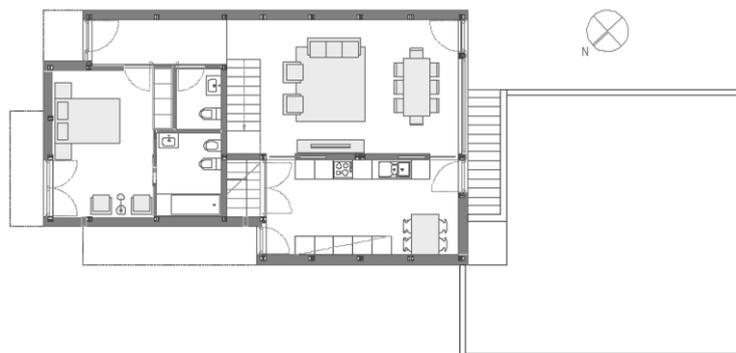
Figura 22 - Enquadramento do edifício de estudo

4.2.2 - Geometria e Factor de Forma

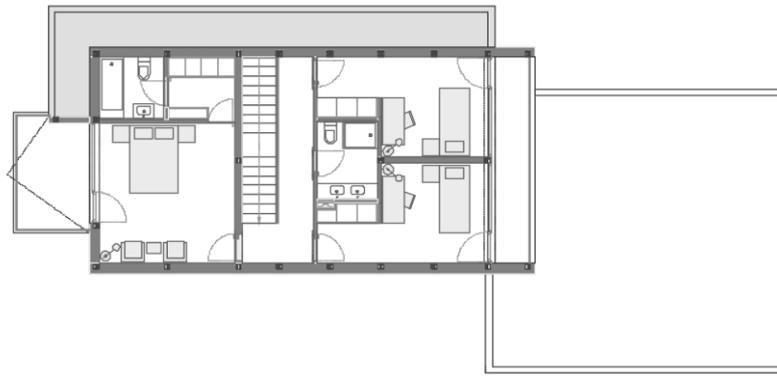
Todos os edifícios pertencentes ao conjunto de lotes serão construídos por uma empresa designada de Modiko[®]. A construção patenteada passa por um sistema modular de aço leve *Light Steel Frame* (LSF). O sistema de construção resulta da interligação de vários elementos metálicos padronizados de tecnologia avançada, (pilares e vigas), com paredes compósitas, as padiais, as platibandas, sistema de cobertura plana e as caixilharias, que depois são montados directamente no local usando equipamentos de elevação ligeiros [35].

O presente caso de estudo é destinado à habitação, constituída por 2 pisos, com três fachadas orientadas a (NE,NO e SO) desobstruída e uma fachada (SE) em contacto com o edifício adjacente. A garagem, totalmente destacada do espaço habitável, foi considerada como um espaço não útil. A nível da envolvente inferior é constituído por um piso térreo e envolvente superior por uma cobertura plana. Contêm palas de sombreamento horizontais e verticais constituintes da geometria do edifício. Quanto à classe de inércia térmica, caracterizada pela capacidade interior de armazenamento de calor que depende da massa superficial útil dos elementos de construção [32], o edifício é classificado como sendo de classe média. No entanto, depois de uma análise detalhada do cálculo térmico disponibilizado pelo projectista, verificou-se que a maior percentagem de massa superficial está concentrada no pavimento térreo, enquanto para as paredes exteriores, o seu valor é bastante reduzido, podendo ser considerado de inércia leve.

A arquitectura do edifício é de tipologia T4, sendo constituído por dois quartos individuais, duas suites, uma sala, uma cozinha e instalações sanitárias. Na Figura 23 são apresentada as plantas do edifício.



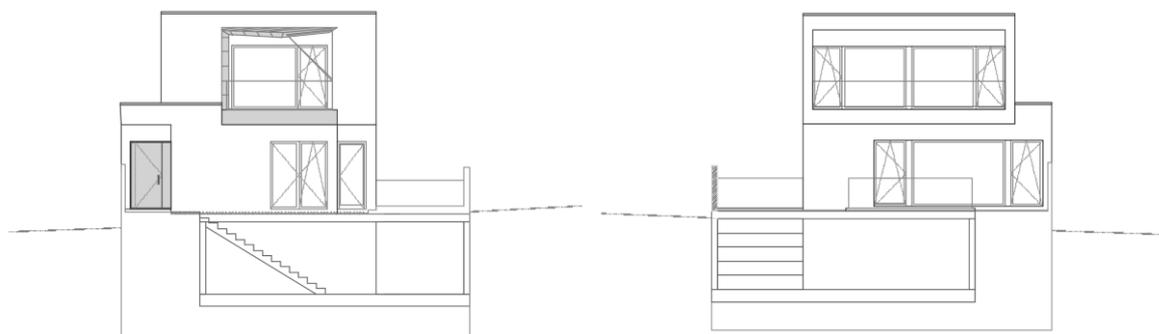
Rés-do-chão



1º Andar

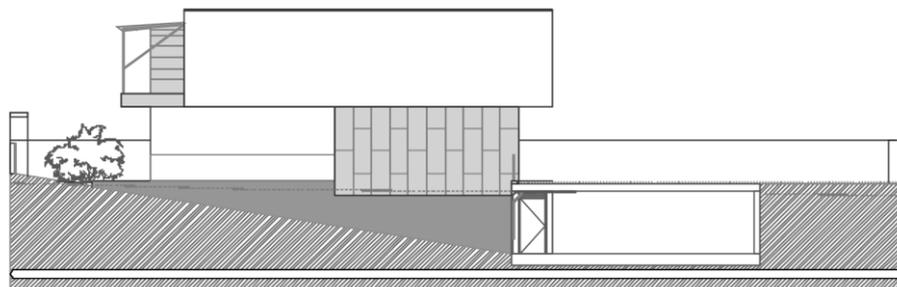
Figura 23 - Plantas de arquitectura

Na Figura 24 são representados os alçados do edifício.

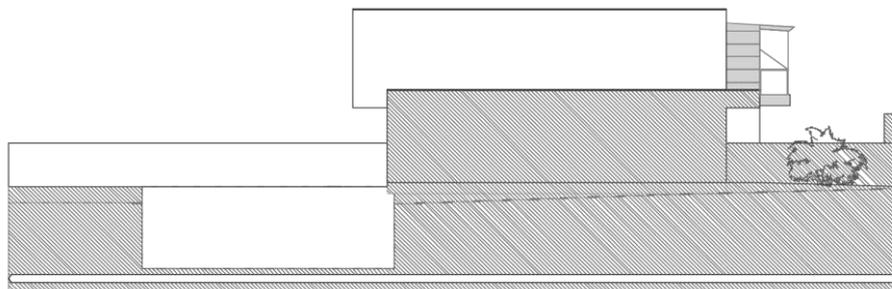


Fachada Nordeste

Fachada Sudoeste



Fachada Noroeste



Fachada Sudeste

Figura 24 – Alçados do edifício

O edifício ocupa 78,1 m² de uma área total de terreno de aproximadamente 440 m². Na

Tabela 2 são apresentadas algumas propriedades geométricas do edifício. A área não útil, isto é, não destinada à ocupação permanente e não climatizada, é apenas a garagem enterrada sem comunicação com o espaço útil. O factor de forma é dado pelo quociente entre o somatório das áreas da envolvente exterior e interior do edifício com exigências térmicas e o respetivo volume interior [32]. Quanto maior for o valor do factor forma, mais irregular é a geometria do edifício. A irregularidade geométrica está directamente relacionada com os problemas associados às pontes térmicas.

Tabela 2 - Propriedades geométricas do edifício

Propriedades Geométricas do Edifício	
Área Útil [m ²]	148,02
Área Não Útil [m ²]	74,76
Volume [m ³]	420,47
Factor de Forma	0,84

Na Tabela 3 é apresentada a área opaca e translúcida e a respectiva relação percentual por orientação de fachada. É de notar que não existem envidraçados nas orientações Noroeste e Sudeste. A fachada Sudoeste constitui a maior percentagem de área envidraçada para tirar partido dos ganhos solares, de forma a minimizar as necessidades de aquecimento do edifício. No entanto, tendo em consideração que aproximadamente 60% dessa fachada é fenestrada (ver Figura 24), prevê-se a necessidade de um estudo cuidadoso das técnicas de sombreamento a adoptar para evitar o sobreaquecimento no período mais quente do ano. Os compartimentos críticos sujeitos a radiação solar durante todo o período diurno são: sala, cozinha e os dois quartos do primeiro andar.

Tabela 3 - Relação percentual entre superfícies opacas e translúcidas

Tipo de Superfície	Total				
Área Opaca, A _o [m ²]	198,36	35,68	63,50	35,68	63,50
Área Translúcida, A _t [m ²]	32,50	11,54	-	20,96	-
A _t /A _o [%]	16,38	32,33	-	58,74	-

4.3 - Caracterização da Envolvente Exterior do Edifício

4.3.1 - Soluções Construtivas e Propriedades Térmicas

As soluções construtivas apresentadas são as padrão, isto é, têm as características do sistema Modiko[®] sem qualquer tipo de otimização a nível de desempenho térmico. A constituição dos elementos da envolvente externa é composta essencialmente por elementos metálicos, o que constitui uma preocupação acrescida quando se pretende minimizar trocas de energia entre o interior e o exterior. Considerou-se por isso fundamental associar a cada heterogeneidade da envolvente o cálculo de uma ponte térmica plana, como se identifica na Figura 25.

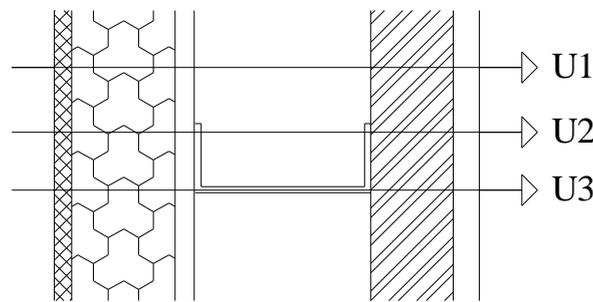


Figura 25 – Exemplo de heterogeneidades das soluções construtivas da envolvente exterior

Os valores para o coeficiente de transmissão térmica foram calculados segundo a ISO 6946 [31]. O valor de cada ponte térmica plana U_{PTP} foi determinado aplicando a expressão 8:

$$U_{PTP} = \frac{1}{R_{Si} + \sum \left(\frac{e}{\lambda} \right) + R_{Se}} \quad (8)$$

U_{PTP} : Coeficiente de transmissão térmica da ponte térmica plana [W/ m².°C];

R_{Si} : Resistência térmica superficial interior [m².°C/W];

R_{Se} : Resistência térmica superficial exterior [m².°C/W];

e : a espessura do material [m];

λ : condutibilidade térmica do material [W/m.°C].

Depois de calculados os U_{PTP} 's, determinou-se o coeficiente de transmissão térmica da solução global U_{global} de cada solução construtiva através da média ponderada da área de cada ponte térmica plana de acordo com a expressão 9.

$$U_{global} = \frac{\sum A_i \times U_{PTPi}}{A_{total}} \quad (9)$$

U_{Global} : Coeficiente de transmissão térmica do elemento construtivo [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

A_i : Área de superfície por onde se transfere o calor da PTPi [m^2];

U_{PTPi} : Coeficiente de transmissão térmica i de cada PTPi [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

A_{total} : Área total do elemento construtivo [m^2].

4.3.2 - Soluções Construtivas da Envolvente

De seguida são apresentadas as soluções construtivas quantificando a massa superficial de cada solução para avaliar a sua influência no valor global da inércia térmica do edifício. A massa útil de cada elemento depende da sua localização no edifício e da sua constituição, nomeadamente do posicionamento do isolamento térmico e das características das soluções de revestimento superficial. O cálculo foi realizado segundo o REH [32]. Os pormenores apresentados são meramente esquemáticos, não apresentando por isso uma escala específica.

4.3.2.1 - Laje de Piso Térreo

Na Figura 26 e Figura 27, são apresentadas as várias camadas que constituem o piso térreo do edifício, variando apenas o revestimento interior. Optou-se pelo cálculo do coeficiente de transmissão térmica da zona maciça do piso e não da zona aligeirada, uma vez que esta apresenta um valor referencial mais desfavorável e a sua área é significativamente inferior à zona maciça. Pelo valor da massa superficial útil apresentado é facilmente justificada a classificação de inércia térmica média atribuída ao edifício.

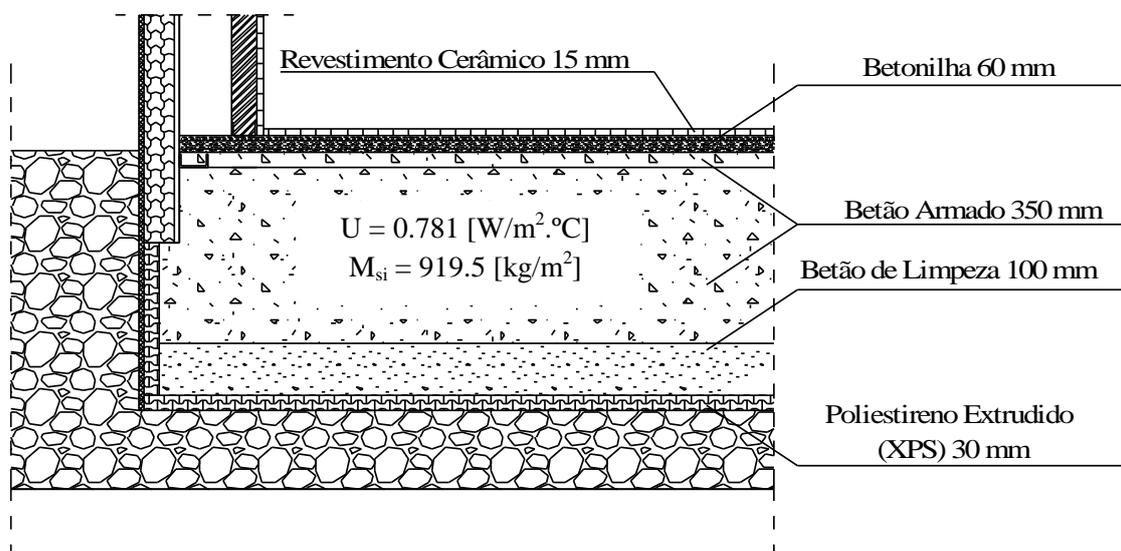


Figura 26 – Pormenor laje de piso térreo – 1 (s/escala)

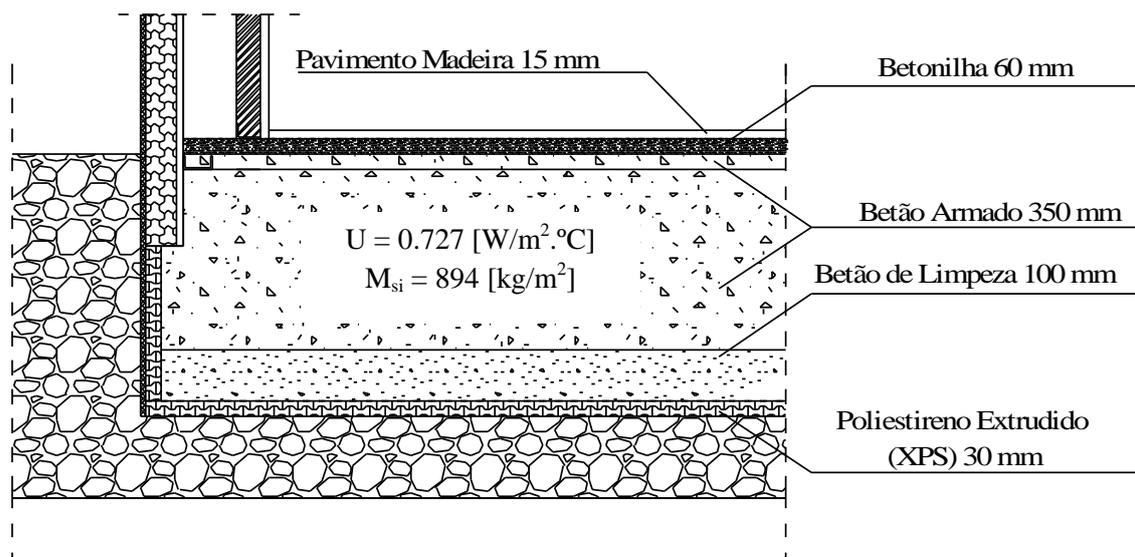


Figura 27 – Pormenor laje de piso térreo – 2 (s/escala)

4.3.2.2 - Paredes Exteriores

Na Figura 28 e Figura 29, são apresentadas as diversas camadas que constituem os painéis das paredes exteriores do edifício, variando apenas o revestimento interior. O valor da massa superficial é muito reduzido, comparativamente às restantes soluções construtivas, já que apenas o painel de gesso cartonado contribui para a quantificação do seu valor. Tal facto não será problemático ao nível do R/Chão, já que o piso térreo maciço acabará por compensar o défice de massa superficial das paredes exteriores.

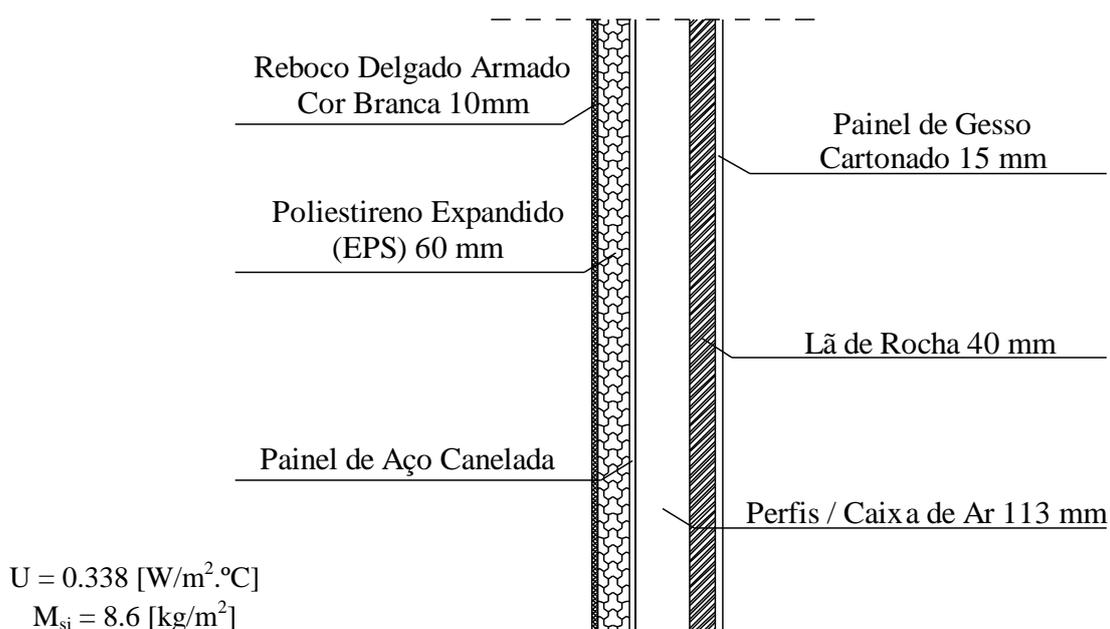


Figura 28 – Pormenor da parede de envolvente exterior – 1 (s/escala)

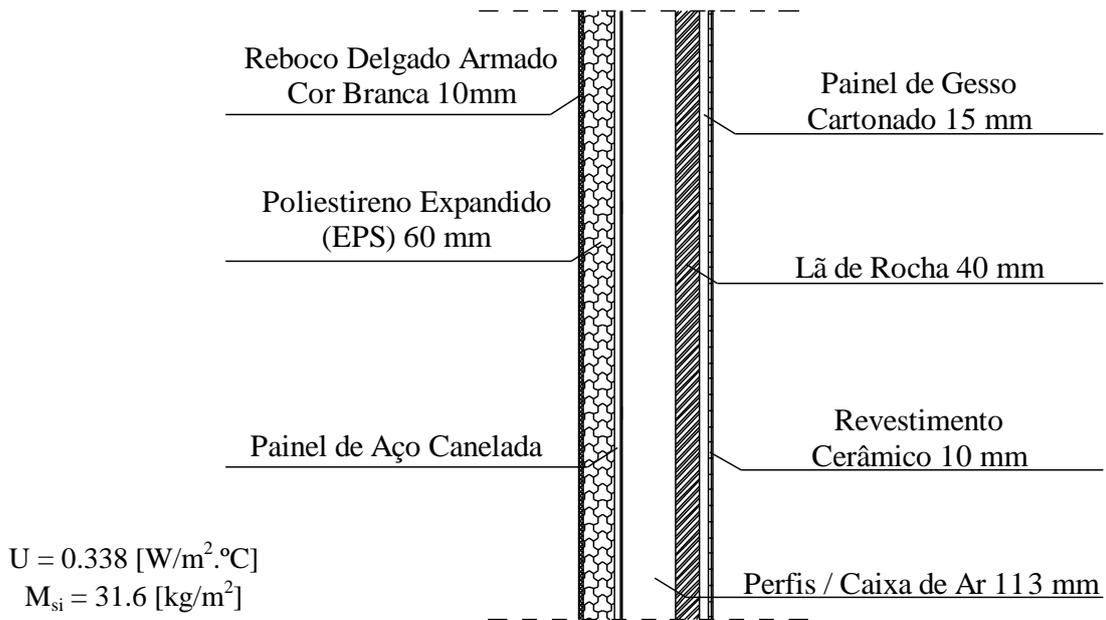


Figura 29 – Pormenor da parede de envolvente exterior – 2 (s/escala)

4.3.2.3 - Pavimento Intermédio

Na Figura 30 e Figura 31, são apresentadas as diferentes camadas que constituem o pavimento interior (tecto do r/c). O valor da massa superficial do pavimento é superior ao das paredes exteriores, no entanto, a sua combinação traduz-se globalmente numa baixa inércia térmica. A este facto acresce ainda a influência da área envidraçada (proporcionalmente elevada em relação dimensão dos compartimentos), tornando-se um desafio, como veremos adiante, controlar as amplitudes térmicas dos dois quartos orientados a sul.

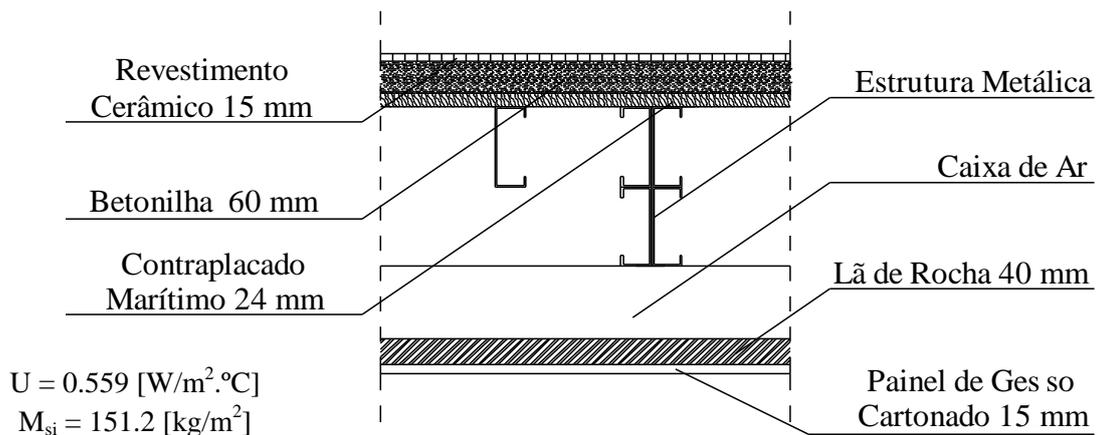


Figura 30 – Pormenor laje de pavimento interior - 1 (s/escala)

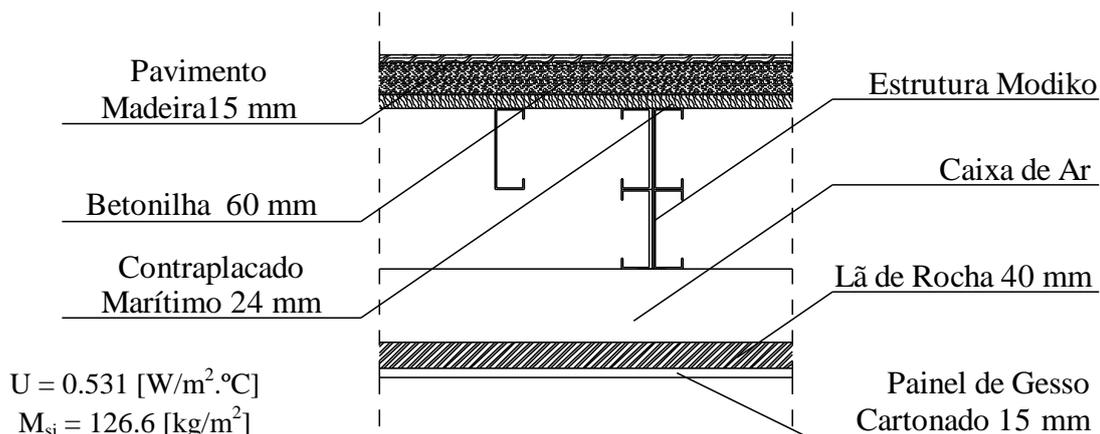


Figura 31 – Pormenor laje de pavimento interior - 2 (s/escala)

4.3.2.4 - Cobertura Plana

Na Figura 32 e Figura 33, são apresentadas as sequências das camadas das coberturas exteriores do edifício. A primeira solução é adoptada em toda a cobertura do 1º Andar e uma pequena porção da sala do R/Chão. A segunda é referente à varanda da suite orientada a Nordeste do 1º Andar. Tendo em conta a área da envolvente exterior das coberturas, os valores para o coeficiente de transmissão térmica são consideravelmente elevados, para que se atinjam necessidades de aquecimento e arrefecimento baixas.

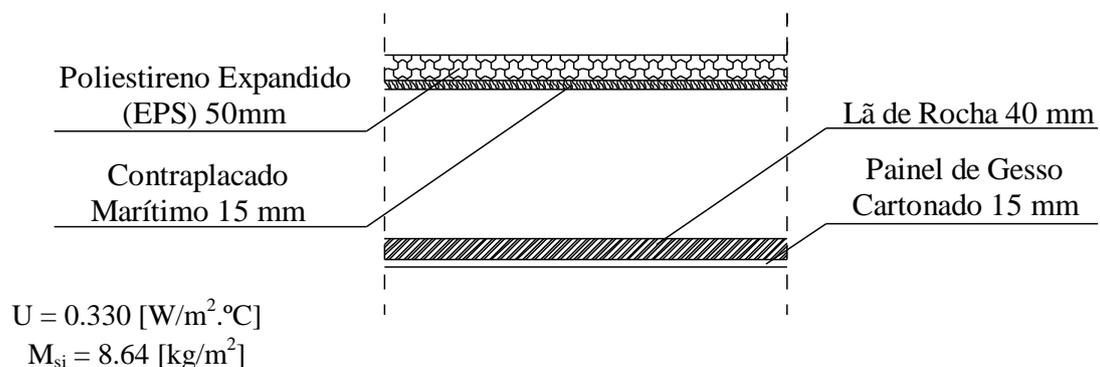


Figura 32 – Pormenor cobertura plana exterior - 1 (s/escala)

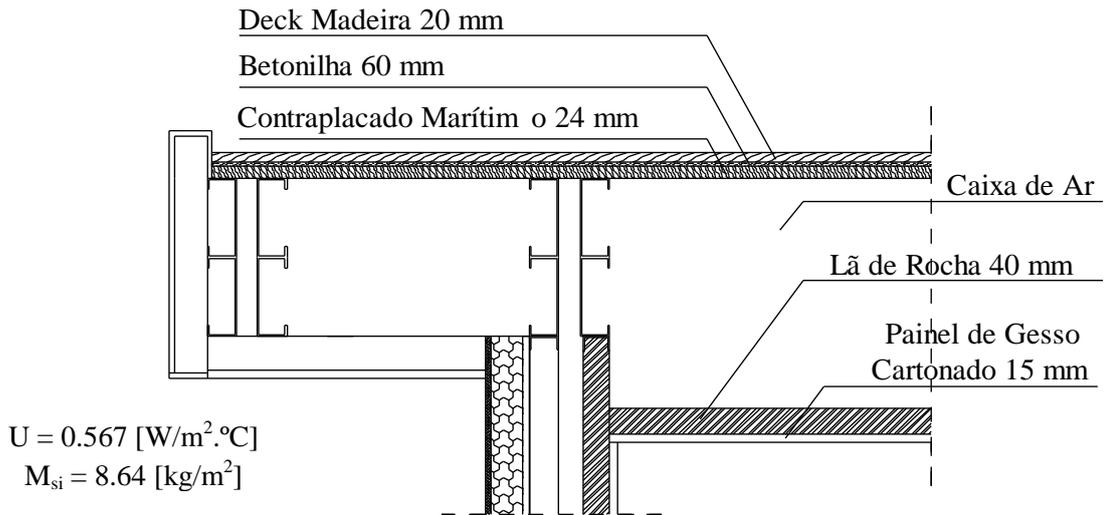


Figura 33 – Pormenor cobertura plana exterior - 2 (s/escala)

Na Figura 34 são apresentados os pontos singulares das soluções construtivas exteriores do edifício de forma esquemática para uma melhor compreensão da sua constituição. Na Figura 34 a) está representado o piso térreo, na Figura 34 b) a cobertura e na Figura 34 c) e 34 d) as paredes exteriores.

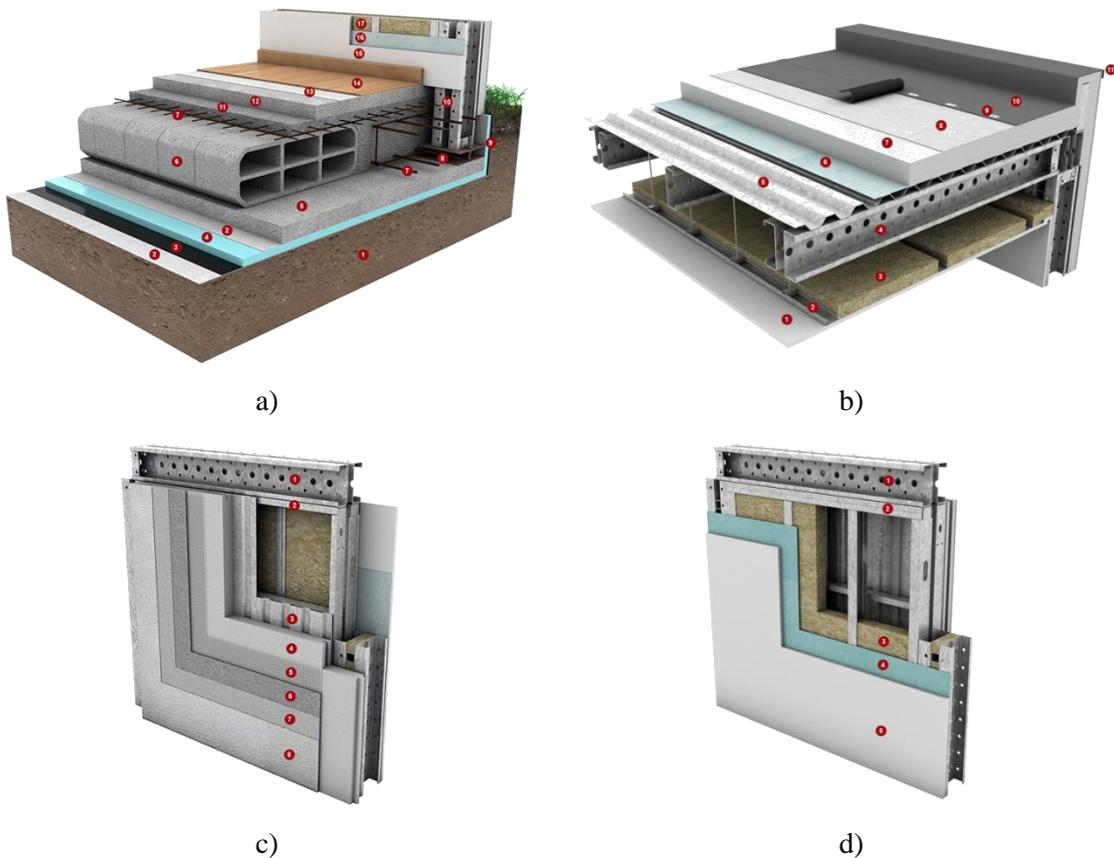


Figura 34 – Pontos singulares das soluções construtivas - adaptado de [34]

4.3.2.5 - Vãos - Portas e Envidraçados

Os envidraçados do edifício são constituídos por uma caixilharia em PVC e vidro duplo [Anexo B]. A espessura do pano de vidro exterior é 6 mm, 14 mm de caixa-de-ar e de 5 mm no pano de vidro interior. A porta de entrada, é constituída por 3mm de PVC branco, 19 mm de MDF hidrófugo e 1,5 mm de alumínio. Os seus coeficientes de transmissão térmica apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes de transmissão térmica dos vãos de porta e janela

$U_{\text{Caixilharia}} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$	$U_{\text{vidro}} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$	$U_{\text{Porta}} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$
2,00	1,30	3,30

O cálculo do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados foi feito através do programa *Passive House Planning Package* (PHPP) [36]. A sua formulação tem em consideração todos os elementos que constituem um envidraçado. Ao contrário do REH [32], inclui uma parcela para ter em conta as pontes térmicas lineares associados ao *spacer* (interface entre o vidro e a caixilharia) e a instalação da caixilharia (interface entre a caixilharia e o suporte). O cálculo foi feito segundo a expressão 10.

$$U_{w,instalação} = \frac{U_v \cdot A_v + U_c \cdot A_c + \Psi_e \cdot l_c + \Psi_{inst.} \cdot l_{inst.}}{A_v + A_c} \quad (10)$$

Em que:

$U_{w,instalação}$: Coeficiente de transmissão térmica do envidraçado [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$];

U_v : Coeficiente de transmissão térmica do vidro [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$];

A_v : Área do vidro [m^2];

U_c : Coeficiente de transmissão térmica da caixilharia [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$];

A_v : Área do vidro [m^2];

Ψ_e : Coeficiente ponte térmica linear do espaçador [W/mK];

l_e : Comprimento linear do espaçador [m];

Ψ_e : Coeficiente ponte térmica linear de instalação [W/mK];

l_c : Comprimento linear da caixilharia [m].

Tendo em conta que existem envidraçados de geometria diferente, obtiveram-se vários valores para os seus coeficientes de transmissão térmica. De forma a otimizar os posteriores estudos paramétricos realizados, foi feita a média do $U_{w,instalação}$ por orientação de fachada. Para os valores relacionados com a instalação da caixilharia,

utilizaram-se valores de referência por defeito propostos pelo PHPP [36]. Na Tabela 5 estão presentes as propriedades dos envidraçados.

Tabela 5 - Coeficientes de transmissão térmica e factor solar dos envidraçados

Envidraçados	Coeficiente de Transmissão Térmica dos Envidraçados [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]	Factor solar (S.H.G.C) [-]
Fachada Nordeste	1,79	0,53
Fachada Sudoeste	1,68	0,53

Para prevenir o risco de sobreaquecimento durante o período de Verão, foi necessário optar pela utilização de um sistema de protecção solar. Dada a dimensão da área envidraçada dos compartimentos mais críticos do edifício, orientados a Sudoeste, foram realizadas algumas simulações preliminares antes de decidir qual o sistema mais adequado. Concluiu-se que apenas com a utilização de persianas colocadas pelo exterior seria possível resolver este problema. Foram analisadas algumas soluções tais como a utilização de *blackouts*, cortinas, persianas interiores e grelhas de sombreamento exteriores.

Foram definidos horários de controlo de fecho e abertura de persianas de forma a tirar partido dos ganhos solares. Esse controlo teve por base o seu aproveitamento durante a estação de aquecimento e a minimização do seu efeito na estação de arrefecimento.

Na definição das propriedades do sistema de protecção solar adoptado no *EnergyPlus* foi necessário especificar as dimensões das réguas que o constituem, bem como, uma série de propriedades relacionadas com a radiação reflectida e difusa e o coeficiente de transmissão térmica das mesmas (ver Tabela 6). As réguas são constituídas perfis de PVC com 2 mm de espessura, preenchidas com 10 mm de lã mineral.

Tabela 6 - Propriedades das réguas do sistema de protecção solar

Orientação da Régua	Altura da régua [mm]	Espessura da régua [mm]	Coeficiente de transmissão térmica [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
Vertical	55,0	14,0	4,2

Para as restantes propriedades térmicas das réguas foram seleccionados os valores propostos pelo programa *EnergyPlus* [28].

4.3.3 - Efeito das Pontes Térmicas na Envoltente Exterior

Depois de calculados os valores dos coeficientes de transmissão térmica para os pilares, vigas e painéis, tendo em conta todas as heterogeneidades de constituição de cada

elemento, procedeu-se à contabilização do seu efeito no comportamento global da fachada exterior do edifício designado de $U_{\text{CorrigidoPT's}}$. Para isso, foi sobreposto o esquema de montagem estrutural aos alçados de arquitectura por forma a quantificar a influência de cada elemento no seu cálculo (ver Figura 33, Figura 34 e Figura 35).

Analogamente ao que foi feito na determinação do U_{global} , para a determinação do $U_{\text{CorrigidoPT}}$ das fachadas exteriores, foi também realizada a média ponderada do coeficiente de transmissão térmica.

Na Figura 35 a) está representada a fachada Nordeste do edifício e na Figura 35 b) a fachada Sudoeste.

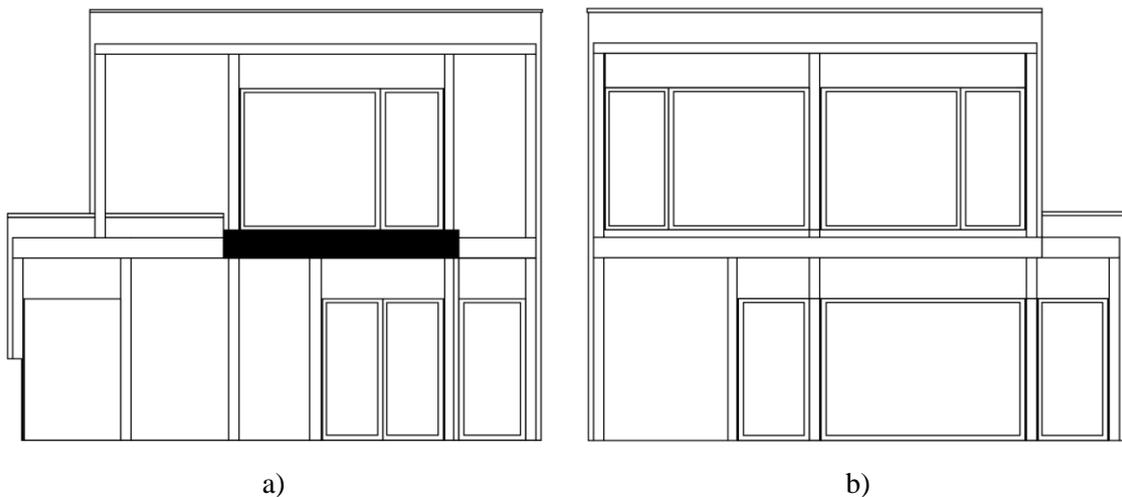


Figura 35 – Sobreposição de alçados da fachada Nordeste e Sudoeste

Na Figura 36, está representada a fachada Nordeste do edifício.

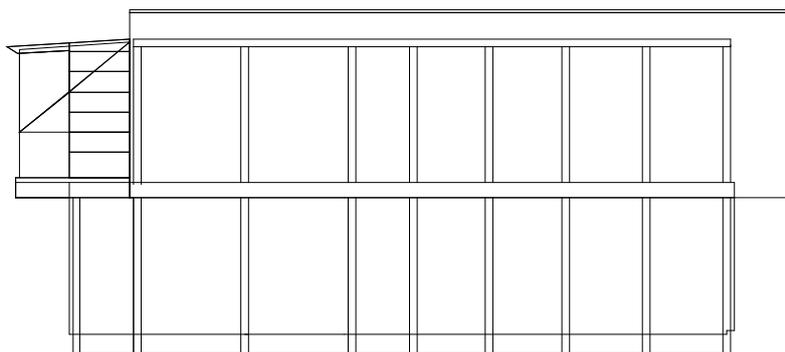


Figura 36 – Sobreposição de alçados da fachada Nordeste

Como resultado final obteve-se um valor uniforme para toda a fachada opaca exterior, que terá então em consideração as perdas de energia através de todos os elementos acima descritos. É possível compreender através da Tabela 7 que efetivamente é importante contabilizar o seu efeito.

Apesar da diferença entre o $U_{\text{ParedesExteriores}}$ e o $U_{\text{CorrigidoPT's}}$ ser aparentemente reduzida, é importante ter em conta a parcela da área total exterior. De uma forma simplista, o edifício irá perder mais 2,35 W/°C tendo em conta os 210 m² de envolvente opaca. Quanto maiores forem as amplitudes térmicas entre o interior e o exterior, maior será o efeito desta diferença.

Tabela 7 - Efeito da consideração das pontes térmicas na fachada exterior

Coeficiente de Transmissão Térmica das Paredes Exteriores	
$U_{\text{ParedesExteriores}}$ [W/m ² °C]	0,327
$U_{\text{CorrigidoPT's}}$ [W/m ² °C]	0,338
$U_{\text{CorrigidoPT's}} - U_{\text{Paredes Exteriores}}$ [W/m ² °C]	0,011

Capítulo 5

Simulação Dinâmica: Aplicação ao Caso
de Estudo

Capítulo 5 - Simulação Dinâmica: Aplicação ao Caso de Estudo

5.1 - Modelo Numérico

5.1.1 - Enquadramento

5.1.2 - Premissas de Simulação

5.1.2.1 - Geometria do Modelo

5.1.2.2 - Vãos de Portas e Janelas

5.1.2.3 - Definição de Zonas Térmicas

5.1.2.4 - Propriedades Termofísicas dos Materiais

5.1.2.5 - Calibração do Coeficiente de Transmissão Térmica da Envolvente Opaca Exterior

5.1.2.6 - Definição dos Ganhos Internos

5.1.2.7 - Ventilação Mecânica e Natural

5.1.2.8 - Necessidades Energéticas Primárias do Edifício

5.1.2.9 - Distribuição Solar

5.1.2.10 – Convergência Numérica e Tempo de Simulação

5.2 - Estudos Paramétricos

Capítulo 5 - Simulação Dinâmica: Aplicação ao Caso de Estudo

5.1 - Modelo Numérico

5.1.1 - Enquadramento

Para a realização da simulação dinâmica foi utilizado o programa *EnergyPlus*. A introdução de dados relativos à geometria é feito com base em sistemas de coordenadas. Para facilitar a definição geométrica do modelo em estudo, utilizou-se o *plug-in OpenStudio*, ferramenta interligada com o *SketchUp* (programa de desenho) que permitiu definir a geometria do modelo de uma forma simples e importá-lo para o *EnergyPlus* sob a forma de coordenadas. O *OpenStudio* é uma plataforma com interface gráfica que utiliza o *EnergyPlus* como ferramenta de cálculo para simulação em regime dinâmico.

O *Legacy OpenStudio* plug-in permite ainda:

- Criar e editar zonas e superfícies;
- Definir condições fronteiras de superfícies;
- Estudo de soluções de sombreamento;
- Definir uma série de parâmetros de cálculo de forma mais intuitiva e simples.

Para além das funcionalidades acima referidas, permite também definir um código de cores para as superfícies interiores e exteriores do edifício. A nível de superfícies exteriores optou-se pela cor:

- Amarela que indica que as superfícies exteriores estão sujeitas à acção solar e do vento;
- Vermelho que indica coberturas;
- Castanho que indica vãos de porta;
- Azul claro indica vãos de janela;
- Roxo que indica superfície de sombreamento (sem propriedades térmicas).

A nível de superfícies interiores optou-se pela cor:

- Amarelo claro que indica que a superfície está em contacto com o solo;
- Verde que indica que se trata de uma parede de interior;

Todas as funcionalidades acima descritas, facilitaram e optimizaram o trabalho. Esta ferramenta foi sem dúvida bastante útil na detecção e resolução de erros relacionados com a definição da geometria do modelo.

5.2 - Premissas de Simulação

Serão apresentadas e discutidas um conjunto de premissas assumidas nas simulações realizadas ao longo do trabalho que de uma forma importante influenciam os resultados que foram obtidos através do programa *EnergyPlus*.

5.2.1 - Geometria do Modelo

Ao definir a geometria do edifício é importante perceber que o *EnergyPlus* não atribui espessura aos elementos da envolvente exterior e interior. As diferentes soluções construtivas são representadas por planos, em que a espessura atribuída aos materiais que os constituem, serve apenas para o cálculo do seu coeficiente de transmissão térmica e para ter em consideração o efeito da massa superficial [37]. Para minimizar o erro, na definição da geometria do edifício, foram consideradas as linhas interiores (face interior) das paredes exteriores e as linhas centrais das paredes de compartimentação interior (ver Figura 37).



Figura 37 – Planta de arquitectura de definição da envolvente do modelo

Para contabilizar o efeito deste ajuste no valor total da área útil do edifício, calculou-se a percentagem de erro associada (ver Tabela 8). Contabilizando as considerações acima descritas, o modelo tem uma área útil 5% superior à planta de arquitectura original. No entanto, considera-se que um erro de 5% não terá grande influência nos resultados.

Tabela 8 - Erro associado à área do modelo

Área Projecto de Arquitectura Original [m ²]	Área do Modelo [m ²]	Erro [%]
140,62	148,02	5,00

Na Figura 38 são representadas duas vistas 3D da geometria exterior do edifício. É facilmente compreensível a função de cada elemento através do código de cores atrás explicado. O edifício adjacente ao de estudo foi modelado apenas por questões de sombreamento.

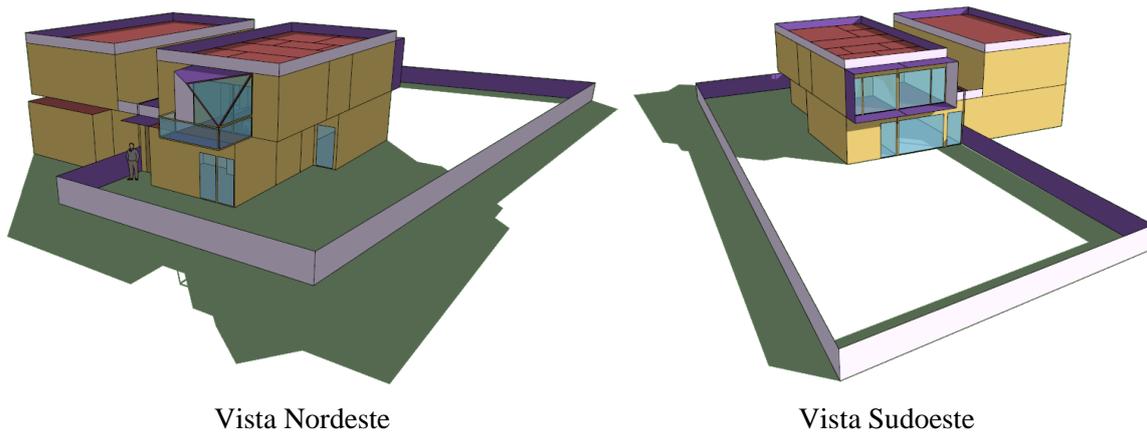


Figura 38 – Geometria do modelo

5.2.2 - Vãos de Portas e Janelas

Não foram contabilizadas portas no modelo, como forma de simplificação e minimização do erro associado à incerteza de estarem ou não abertas. A existência de portas influenciaria os resultados de forma significativa se a elas estivesse associado um horário de operacionalidade (abertura ou fecho), permitindo ou não a passagem de massa de ar entre zonas térmicas. Como o estado de abertura de uma porta é bastante difícil de prever com exactidão e tendo por base o conceito *Passive House* em que é feita extracção de ar nos compartimentos de serviço e insuflação de ar nos compartimentos principais, optou-se por não as modelar. Assim assume-se de forma simplificada que estão sempre fechadas, não interferindo desta forma no sistema de ventilação mecânico considerado em alguns modelos numéricos.

Quanto aos vãos de janela, foi necessário preparar o modelo numa fase inicial para poderem ser avaliados os sistemas automatizados de fecho de persianas exteriores. Para isso foi necessário definir uma divisão nos envidraçados para que quando o sistema fosse accionado, a persiana não cobrisse a totalidade da área do vidro. Na Figura 39 a) é representado o modelo sem a divisão e na Figura 39 b) o modelo com a divisão. Cada

envidraçado foi separado em duas áreas, uma superior de 70%, responsável por garantir o sombreamento e uma inferior de 30%, para garantir a luminosidade. Desta forma o sistema de protecção solar, independentemente da altura do dia em que seja accionado, nunca irá comprometer a luminosidade total dos compartimentos.

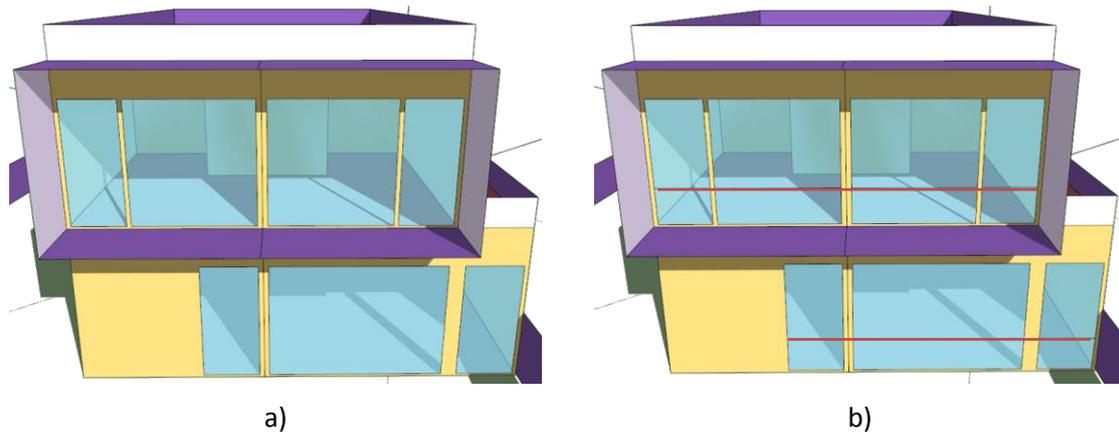


Figura 39 – Divisão vãos envidraçados da orientação Sudoeste

5.2.3 - Definição de Zonas Térmicas

Uma zona térmica não constitui necessariamente um compartimento individualizado, um quarto ou uma sala de um apartamento, mas sim um espaço, ou um conjunto de espaços, sujeito a condições de controlo térmico semelhante [38]. Foram consideradas nove zonas térmicas correspondentes aos compartimentos interiores do edifício (ver Figura 40). Quatro zonas pertencentes ao R/Chão e outras quatro pertencentes ao 1º Andar. A nona zona térmica é relativa ao edifício adjacente para ter em conta os efeitos de sombreamento conforme já foi referido na secção anterior. A zona térmica da sala no R/Chão é comum à zona de circulação do primeiro andar por meio da abertura do vão de escadas. Correspondentemente têm-se: ZT1 – Sala e corredor circulação; ZT2 – Cozinha no R/Chão; ZT3 – Suite R/Chão; ZT4 – Instalações sanitárias R/Chão; ZT5 – Suite 1ºAndar; ZT6 – Instalações sanitárias 1º Andar; ZT7,ZT8 – Quartos 1º Andar; ZT9 – Edifício adjacente. A garagem não foi introduzida no modelo porque para além de ter sido considerada um espaço não útil, não está em contacto directo com o edifício simulado.

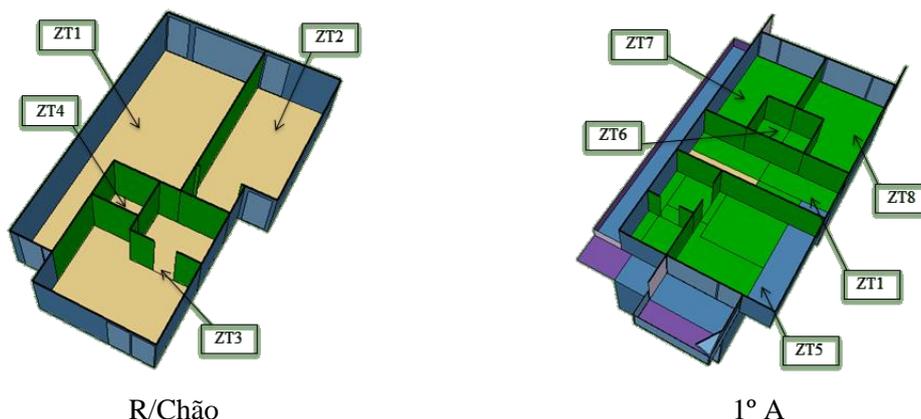


Figura 40 – Divisão das zonas térmicas do edifício

5.2.4 - Propriedades Termofísicas dos Materiais

Na caracterização dos materiais pertencentes a cada solução construtiva foi necessário definir um conjunto de propriedades termofísicas, (ver Tabela 9) [39], [40].

Tabela 9 - Propriedades Termofísicas dos materiais

Material	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]	Densidade [kg/m ³]	Calor Específico [J/kg.k]
Betão de Limpeza	1,65	2000	1000
Betonilha (Betão Cavernoso)	1,15	1600	1000
Reboco Armado	1,30	1800	1046
Betão Armado	2,00	2300	1000
Poliestireno Extrudido (XPS)	0,037	25	1400
Poliestireno Expandido (EPS)	0,037	25	1400
Lã de Rocha	0,040	40	840
Contraplacado Marítimo	0,13	500	2720
“Deck” de Madeira	0,13	500	2720
Pavimento Flutuante (Madeira)	0,14	600	2720
Revestimento Cerâmico	1,3	2300	965
Gesso Cartonado	0,25	720	950
Painel Aço	50	7800	480

Através do coeficiente de condutibilidade e da espessura inserida para cada material, é possível determinar o coeficiente de transmissão térmica. A densidade e o calor específico são fundamentais na consideração do efeito da inércia térmica do edifício.

5.2.5 - Calibração do Coeficiente de Transmissão Térmica da Envolvente Opaca Exterior

Uma das propriedades necessárias na definição dos materiais é a rugosidade. Existem seis classes de rugosidade distintas por defeito no *EnergyPlus*: muito rugoso, rugoso, médio rugoso, médio macio, macio ou muito macio. Não existindo tabelas específicas para determinação deste parâmetro, sendo considerado por isso de classificação relativa e pouco precisa, foi necessário compreender o modo como o programa contabiliza esta característica na metodologia de cálculo. Os coeficientes de resistência superficial interior e exterior que afectam o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica das superfícies dependem da rugosidade.

Depois de definidas as camadas pertencentes às soluções construtivas do modelo, extraíram-se os valores de U calculados pelo programa. A partir desses valores, por forma a desprezar o parâmetro da rugosidade e para ter em conta o cálculo das pontes térmicas atrás exposto, procedeu-se à calibração dos mesmos. Essa calibração foi feita através da alteração da resistência térmica da caixa-de-ar de cada solução construtiva. Foi assim calculado, qual o valor da resistência térmica da caixa-de-ar necessário para que o valor de U fosse igual ao pretendido, isto é, calculado analiticamente. Para as soluções construtivas sem caixa-de-ar, foi adicionada uma camada fictícia quando necessário, sempre com o cuidado de não alterar a massa superficial das mesmas.

5.2.6 - Definição dos Ganhos Internos

Os ganhos internos são quantificados pela soma total da energia associada à actividade metabólica dos ocupantes do edifício, sistemas de iluminação e equipamentos. A definição desta variável é extremamente importante pela forma como influenciará o comportamento térmico global do edifício, já que, é responsável por elevar a temperatura do ar insuflado, por vezes acima da temperatura de conforto na estação de aquecimento.

É fundamental compreender que na sua quantificação, o presente caso de estudo é real, e na fase em que a dissertação foi desenvolvida ainda não existia informação detalhada relativamente ao tipo de iluminação e equipamentos que serão utilizados. Outro aspecto importante foi a dificuldade em encontrar informação de estudos de ocupação de edifício. Considerou-se uma variável bastante difícil de quantificar por depender também dos hábitos existentes em cada país e das rotinas familiares individuais. O programa *Passive House Planning Package PHPP* [36], estabelece para edifícios

residenciais considerados *Passive Houses*, o valor *standard* de 2.1 W/m^2 para ganhos internos gerados pelos equipamentos eléctricos, pelos ocupantes e iluminação. Considerou-se então a existência de um sistema de iluminação em cada compartimento equivalente ao valor de 2.1 W/m^2 [36].

5.2.7 - Ventilação Mecânica e Natural

Será objectivo de estudo intenso, adiante, técnicas de ventilação através de sistemas mecânicos e ventilação natural. Com isto, pretende-se garantir que todo o edifício se encontra dentro da gama de temperaturas de conforto, entre os 20 e os 26°C, nunca ultrapassando o número de renovações máximo definidos pela *Passive House* ($< 0.6 \text{ rph}^{-1}$).

Serão avaliados sistemas HVAC comuns (edifício original), sistemas de HVAC com a um permutador de fluxos cruzados (edifícios otimizados), responsável pela troca de energia entre o ar extraído e o ar insuflado nas diferentes zonas térmicas. Serão também avaliadas técnicas relacionadas com o sistema de ventilação mecânico mas numa vertente mais passiva com recurso ao *bypass* durante a estação de arrefecimento (sempre que a temperatura do ar exterior for inferior à do ar em cada zona térmica, será feita uma insuflação directa sem passagem pelo permutador).

As características introduzidas no programa têm por base o aparelho que será colocado nos modelos otimizados (ver Figura 41). Trata-se de uma unidade compacta, composta por uma unidade de ventilação, uma unidade passiva de recuperação de calor, um sistema de aquecimento/arrefecimento para compensar a temperatura do ar quando o permutador de fluxos cruzados não é suficiente, um sistema de aquecimento de águas sanitárias e um acumulador. Segundo a ficha térmica PH, presente no [Anexo B], o permutador apresenta um rendimento de 80%.



Figura 41 – Unidade compacta – certificada pela *Passive House*

Para a definição dos sistemas de ventilação mecânica, foi necessário definir um termostato, ao qual foi atribuído o *setpoint range* de temperatura de 20 a 26°C. Foi também necessário definir um caudal de insuflação para cada zona térmica correspondente a 60% do seu volume, garantindo desta forma as 0,6 rph⁻¹ (ver Tabela 10).

Tabela 10 - Caudais de insuflação/extracção (0.6 rph⁻¹) por zona térmica

Zona Térmica	Volume [m ³]	Caudal de Insuflação/Extracção [m ³ /s]
ZT1 – Sala	134,94	0,0225
ZT2 - Cozinha	54,52	0,0091
ZT3 – Suite R/Chão	71,29	0,0119
ZT4 – Instalação Sanitária R/Chão	7,67	0,0013
ZT5 – Suite 1ºAndar	72,49	0,0123
ZT6 – Instalação Sanitária 1ºAndar	11,96	0,0020
ZT7 – Quarto (1) 1ºAndar	33,81	0,0056
ZT8 – Quarto (2) 1ºAndar	33,81	0,0056

De uma forma simplificada foi atribuída a cada zona térmica um sistema individual de ventilação, capaz de insuflar e extrair ar com base no caudal definido na Tabela 10. Dependendo do modelo de estudo e da estação considerada (aquecimento/arrefecimento), nas soluções optimizadas, atribuiu-se a cada sistema de ventilação um *economizer*, dispositivo responsável pela realização do *bypass*, e um *heat recovery*, com uma eficiência de 80%. Com a definição destes sistemas foi possível quantificar as necessidades de aquecimento e arrefecimento.

Para a contabilização do efeito da ventilação natural no edifício foi utilizado o menu *ZoneVentilation:WindandStackOpenArea* [27]. Esse menu tem em consideração o efeito simultâneo da abertura de janelas e o efeito chaminé, em que a ventilação ocorre por diferencial de pressão/temperatura. A ventilação por efeito chaminé não foi contabilizada, por não terem sido utilizadas portas interiores no modelo (sem a sua existência não há transmissão de caudal de ar entre zonas térmicas). Para simular a eficácia da abertura de janelas durante o período nocturno foi fundamental compreender a forma como o programa *EnergyPlus* o contabiliza, de acordo com a expressão 10:

$$Q_v = C_v * A_{abertura} * F_{horária} * V \quad (11)$$

Q_v – caudal de ar impulsionado pelo vento [m^3/s];

C_v – coeficiente que tem em conta a eficiência da abertura da janela;

$A_{abertura}$ – área de abertura do envidraçado [m^2];

$F_{horária}$ – coeficiente que define se a janela está ou não aberta;

V – velocidade do vento [m/s].

O coeficiente de eficiência de abertura de janela [27], varia entre 0 e 1, influenciando o caudal de insuflação consoante a direcção exterior do vento é ou não benéfica, exprimida pela expressão 12.

$$C_v = 0.55 - \frac{|\text{Ângulo efectivo} - \text{Direcção do Vento}|}{180} * 0.25 \quad (12)$$

O ângulo efectivo é definido manualmente para cada envidraçado. Representa o ângulo relativamente ao Norte, ou seja, um envidraçado orientado a Norte terá um ângulo de 0° , orientado a Este de 90° e assim sucessivamente. A direcção do vento é retirada do ficheiro climático, previamente editado, de forma automática.

Na Figura 42 estão representados todos os envidraçados do edifício com rectângulos. Os numerados são do tipo oscilo-batente.

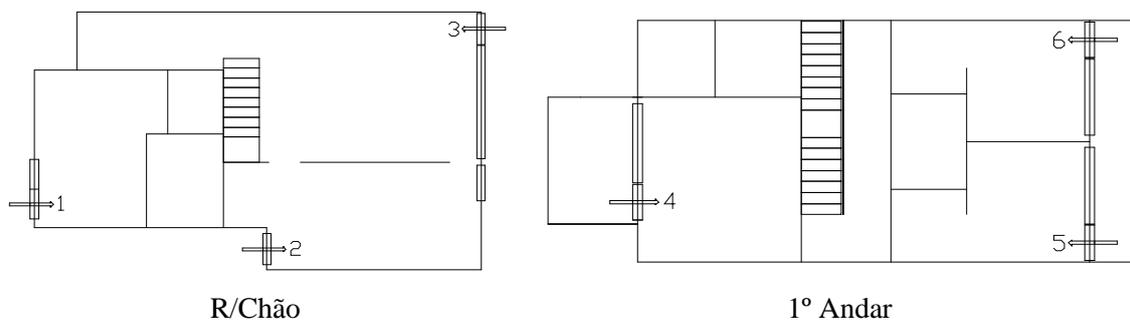
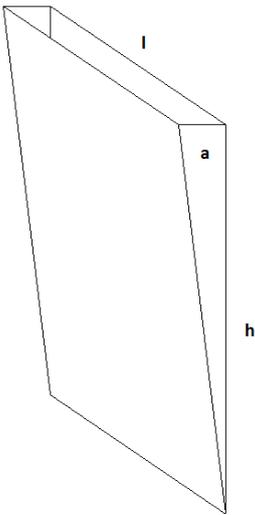


Figura 42 – Identificação dos envidraçados oscilo-batentes

Na Tabela 11 são apresentadas as áreas de abertura por envidraçado. A dimensão “a” representa a abertura máxima do envidraçado oscilo batente, a dimensão “l” representa a largura do envidraçado e a dimensão “h” representa a altura.

Tabela 11 - Área de abertura por janela

Janela / Orientação	a [m]	l [m]	h [m]	Área Abertura [m ²]
1 / Nordeste	0,05	0,9	2,10	0,15
2 / Nordeste	0,05	1,00	2,10	0,16
3 / Sudoeste	0,05	1,00	2,10	0,16
4 / Nordeste	0,05	0,97	2,10	0,15
5 / Sudoeste	0,05	0,97	2,10	0,15
6 / Sudoeste	0,05	0,97	2,10	0,15



O diagrama mostra uma janela trapezoidal com dimensões: 'a' representa a largura da base, 'l' representa a largura do topo e 'h' representa a altura da janela.

A velocidade do vento assim como a sua direcção é retirada automaticamente do ficheiro climático consoante o *timestep* definido para a análise do modelo.

5.2.8 - Necessidades Energéticas Primárias do Edifício

Um dos requisitos de uma *Passive House* é que o valor máximo de energia primária seja inferior a 120 kWh/m².a. Para a sua estimativa é necessária a quantificação das necessidades energéticas associadas à iluminação, equipamentos e sistema de aquecimento de águas sanitárias (AQS). Para determinar o consumo associado a cada uma destes elementos, foi utilizado o programa PHPP [36]. É importante referir que no cálculo do consumo energético associado ao aquecimento da água foi contabilizada a contribuição dos painéis solares. Na Tabela 12 são apresentados os valores obtidos para o edifício original e para os edifícios optimizado *Passive House*.

Tabela 12 - Estimativa das necessidades energéticas associadas aos equipamentos, iluminação e AQS

Necessidades Energéticas [kWh/m ² .a]	Edifício Original	Edifício Optimizado <i>Passive House</i>
Equipamentos e Iluminação	41,00	54,30
Água Quente Sanitária	35,87	15,47

O valor de AQS diminuiu significativamente no edifício original comparativamente ao edifício optimizado *Passive House*, pela utilização de uma unidade compacta (sistema de ventilação com bomba de calor). No entanto, o valor dos equipamentos sobe cerca de 15% devido à necessidade de utilização dessa unidade.

5.2.9 - Distribuição Solar

Relativamente à distribuição solar no edifício foi seleccionado o campo *FullExteriorWithReflections*. Ao escolher este tipo de distribuição solar todos os elementos do modelo contribuem para a existência de sombreamento, como a existências de palas, saliências ou sistemas de protecção solar de portas e janelas. É assumido que toda a radiação incidente em cada zona térmica é absorvida pelo piso. A radiação reflectida é adicionada à radiação difusa transmitida, sendo uniformemente distribuída pelas restantes superfícies. Outra opção passaria pela escolha de outro tipo de distribuição como *FullInteriorAndExteriorWithReflections*, passando a radiação incidente em cada espaço a ser absorvida por todas as superfícies e não somente pelo piso. No entanto, como no presente caso de estudo existem apenas compartimentos não convexos (como o caso da sala de estar e da cozinhas (ver Figura43), é aconselhada a utilização do primeiro tipo de distribuição exposta [28].

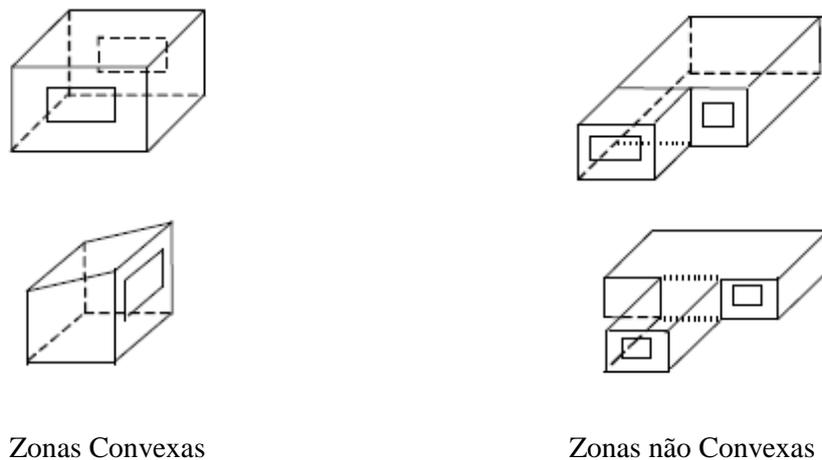


Figura 43 – Zonas convexas e não convexas [28]

Com a definição de um modelo tridimensional localizado nas coordenadas reais e com recurso ao *plug-in OpenStudio*, foi possível compreender numa fase inicial de forma simplificada a influência de algumas das soluções de sombreamento analisadas. Na Figura 44 a) e b), é apresentada a grelha de sombreamento, bastante utilizada, e na Figura 44 c) e d) é apresentado a solução original de projecto apenas com as palas verticais e horizontais originais do edifício.

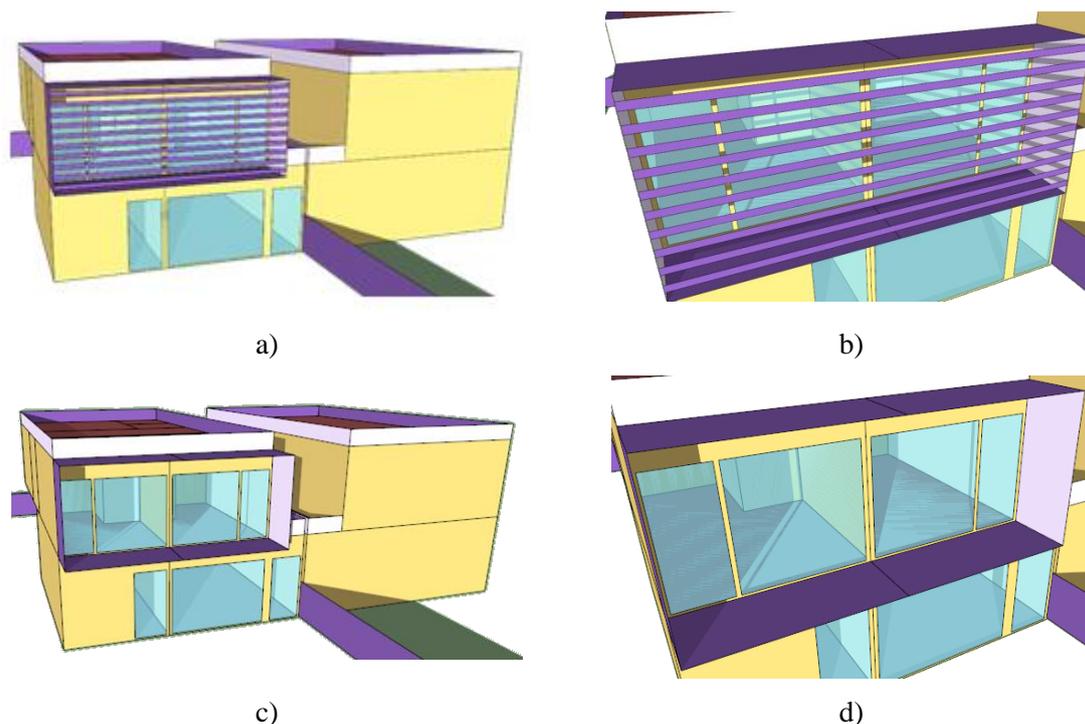


Figura 44 – Algumas soluções de sombreamento pré-analisadas

5.2.10 – Convergência Numérica e Tempo de Simulação

O valor inserido para o *timestep* corresponde ao número de partes em que a unidade horária é dividida, podendo variar entre 1 e 60 (são apenas válidos números divisíveis por 60). O valor seleccionado para o campo “*number of timesteps per hour*”, será utilizado no cálculo do balanço térmico de cada zona do modelo e quanto maior for o seu valor maior será o tempo de cada simulação. Para compreender a forma como este parâmetro influenciaria os resultados com o objectivo de otimizar o tempo decorrente das simulações e perdendo o mínimo de precisão possível, realizou-se um estudo de sensibilidade. Foram avaliadas as temperaturas de todas as zonas térmicas e foi feita a média do seu valor para um período anual para os valores de *timestep* de 4, 6, 10, 20, 30 e 60.

Como se pode verificar da análise da Tabela 13, a média dos valores de temperatura não apresenta uma tendência de subida ou descida padrão com o aumento ou diminuição do *timestep* inserido. Concluiu-se que a escolha do valor máximo de 60 para este campo (intervalos de análise de minuto a minuto), não é sinónimo de precisão máxima.

Tabela 13 – Resultados do estudo de sensibilidade

TimeStep	Temperatura Média do Ar em cada Zona Térmica [°C]							
	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4	ZT5	ZT6	ZT7	ZT8
4	22,14	21,76	20,64	21,32	21,10	23,93	24,69	24,52
6	22,13	21,76	20,64	21,31	21,09	23,92	24,68	24,51
10	22,13	21,76	20,64	21,31	21,09	23,92	24,67	24,50
20	22,14	21,77	20,65	21,33	21,10	23,93	24,69	24,52
30	22,13	21,76	20,64	21,31	21,09	23,91	24,67	24,50
60	22,15	21,80	20,66	21,34	21,11	23,94	24,69	24,53

Segundo o manual do programa valores de *timestep* mais reduzidos (intervalos iguais ou inferiores a 10 minutos), melhoram o cálculo do balanço térmico de cada zona, enquanto, valores mais elevados poderão induzir erros. Dos vários critérios apresentados o programa aconselha a utilização de um valor de 4 para simulações sem sistemas HVAC, um valor de 6 para simulações com HVAC, 20 como sendo o mínimo para simulações *ConductionFiniteDifference* (CFD) e ainda simulações em que se tenha em conta o efeito da humidade [28].

Considerou-se então um valor de 6 para o *timestep* de todas as simulações, o que significa que os resultados poderão ser obtidos com um intervalo de precisão de 10 minutos.

5.2 - Estudos Paramétricos

Na escolha das variáveis para a realização dos estudos paramétricos, por se tratar de um caso de estudo real, foram tidas em consideração as limitações físicas do edifício. Isto significa que não foram seleccionados parâmetros de impossível implementação, tais como a rotação do edifício, alteração da geometria das palas de sombreamento, etc.

Optou-se pela construção de quatro modelos base, diferenciados pelas técnicas de ventilação mecânica e natural utilizadas. Esses modelos foram igualmente otimizados através da alteração da espessura de isolamento das soluções construtivas da envolvente exterior, aumento de inércia térmica, utilização de vidro triplo em substituição de um duplo e utilização de sistemas automáticos de protecção solar. Optou-se pela escolha da variável isolamento térmico dado que as espessuras utilizadas no edifício original, isto é, (3 cm para o pavimento, 5 cm para a cobertura e 6 cm para as paredes exteriores), não são suficientes para cumprir os critérios *Passive House*. Como os edifícios perdem uma maior quantidade de energia através envolvente exterior, pretende-se reforçar o

isolamento nas paredes e na cobertura comparativamente ao piso térreo. Foram criados mais dois cenários de soluções de isolamento, com o objectivo de melhorar os coeficientes de transmissão térmica exteriores e uniformizar a distribuição de isolamento.

O aumento de inércia térmica está directamente relacionado com a tipologia construtiva (metálica pré-fabricada), como já foi demonstrado no capítulo de caracterização das soluções construtivas exteriores a massa superficial das paredes é extremamente reduzida. Com este aumento, pretende-se comprovar que é possível controlar melhor os picos de temperatura máxima e diminuir o risco de sobreaquecimento das diferentes zonas térmicas. De modo a simular o aumento da inércia térmica, adicionou-se uma camada de 2cm de reboco pelo interior de todas as paredes exteriores e interiores. Também se irá avaliar a influência da alteração do vidro duplo pelo triplo, reflectido no cálculo dos coeficientes de transmissão térmica médios por orientação de fachada. Mantiveram-se todos os restantes materiais, caixilharia e *spacers*.

Por fim será avaliada a influência da utilização de um sistema automatizado de protecção solar durante a estação de arrefecimento. É fundamental reduzir o risco de sobreaquecimento. Comparando as duas soluções, partir-se-á do pressuposto que os ocupantes do edifício não tem por hábito fechar as persianas de forma a reduzir os ganhos solares. Na Tabela 14, é apresentado o horário de funcionamento para cada sistema. Foi escolhido o valor de temperatura de 23°C para a activação automática. Será possível a realização de uma optimização final, fazendo variar o valor da temperatura a partir do qual o sistema de protecção solar é activado.

Tabela 14 - Horário de funcionamento dos sistemas de protecção solar

Sistema Accionamento Manual		Sistema Accionamento Automático		
Inverno	Verão	Inverno	Verão	
100% - Fechado	100% - Fechado	100% - Fechado	70% - Fechado	100% - Fechado
18:00 às 8:00	00:00 às 8:00	18:00 às 8:00	8:00 à 00:00 (*)	00:00 às 8:00

(*) No sistema automático, todas as zonas térmicas contêm um sensor de temperatura em que 70% da altura da janela é protegida pela protecção solar sempre que a temperatura atinge os 23°C dentro do compartimento

Na Figura 45 é representado tudo o que foi descrito anteriormente de forma esquemática. Na primeira coluna estão inumerados os quatro modelos base:

(1) (Modelo Original + HVAC Tradicional) considerado o modelo original, contém um sistema comum de climatização com um *setpoint* de funcionamento que garanta uma temperatura do ar no interior da habitação dentro do intervalo de 20 a 26.°C. O sistema de climatização funcionará na estação de aquecimento e arrefecimento. Com este modelo pretende-se simular a tecnologia utilizada no edifício original, para posteriores confrontos com os outros modelos *Passive Houses*.

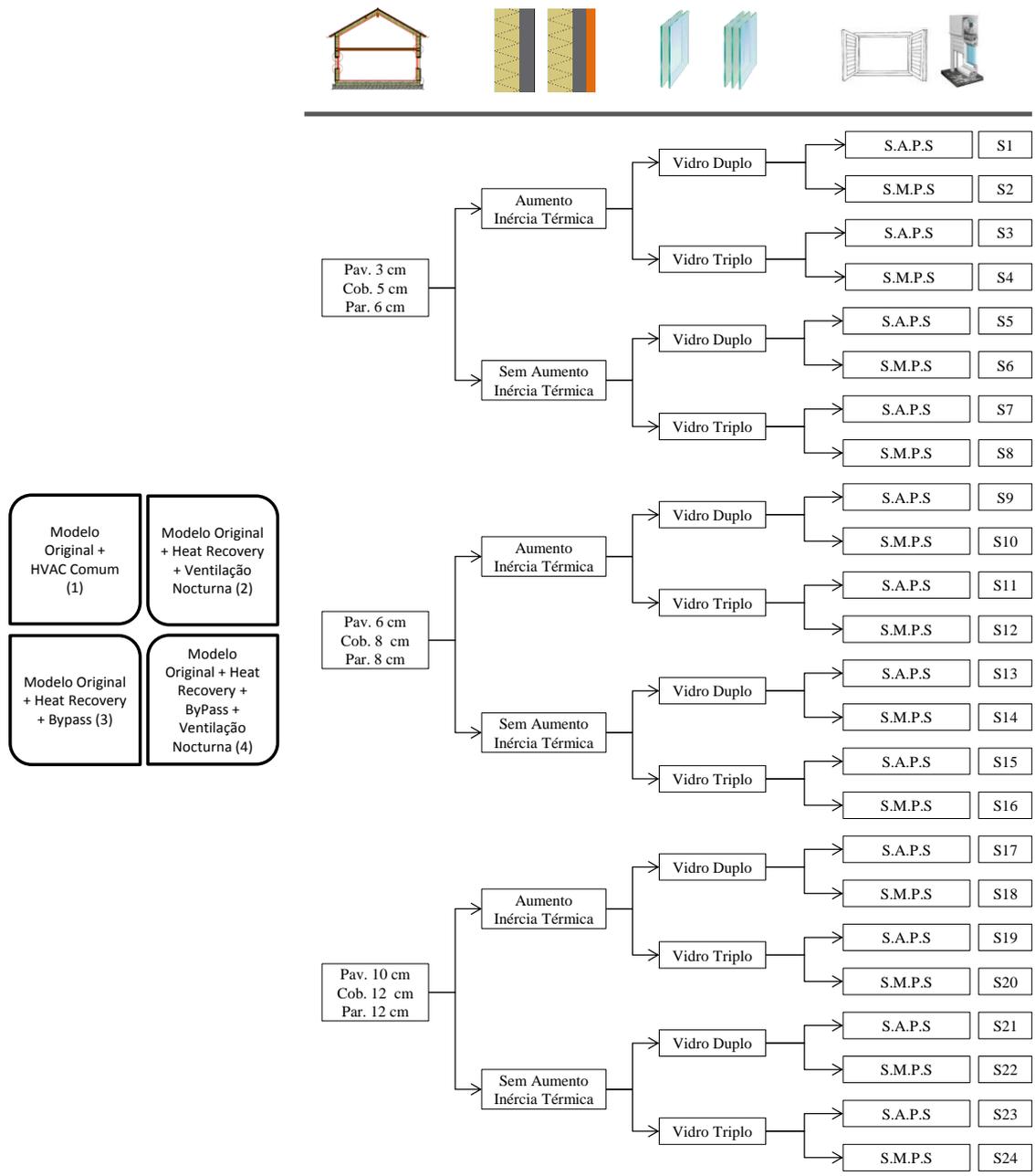
(2) (Modelo Original + *Heat Recovery* + Ventilação Nocturna), assume-se o mesmo sistema de climatização, para o mesmo *setpoint* de temperatura interior, com a acoplação de um permutador de fluxos cruzados com uma recuperação de energia até 80%. O sistema de climatização funciona apenas na estação de aquecimento. Na estação de arrefecimento foi adoptada a estratégia de ventilação nocturna através da abertura de janelas. Pretende-se com este modelo avaliar uma vertente mais passiva, apresentado um valor nulo para as necessidades de arrefecimento.

(3) (Modelo Original + *Heat Recovery* + *ByPass*), é igual ao anterior no que respeita à estação de aquecimento. Na estação de arrefecimento é avaliada a funcionalidade do modo *bypass* do aparelho. Com este modelo pretende-se avaliar um edifício em que o comportamento térmico interior é 100% controlado por um sistema mecânico de ventilação.

(4) (Modelo Original + *Heat Recovery* + *ByPass* + Ventilação Nocturna) é a junção dos dois modelos anteriores. Isto é, pretende-se com este modelo reduzir ao máximo o risco de sobreaquecimento.

Foram efectuados então 4 modelos base, diferenciados essencialmente pela estratégia de ventilação utilizada e para cada um deles foram criados 24 submodelos de optimização, dando um total de 96 modelos diferentes. A Figura 45 deverá ser lida da esquerda para a direita. Do lado esquerdo do esquema são representados os 4 modelos base e do lado direito as 24 soluções de optimização para cada um deles.

Para efeitos de caracterização será enumerado o modelo base e de seguida o número da simulação (a título de exemplo M1_S2: significa que refere ao “Modelo Original + HVAC Comum”, com a primeira combinação de isolamento, aumento de inércia térmica com recurso a um revestimento superficial interior, uso de vidro duplo e sistema manual de protecção solar.)



(*) S.A.P.S – Sistema automático de protecção solar. S.M.P.S – Sistema manual de protecção solar

Figura 45 – Esquema resumo dos estudos paramétricos

Capítulo 6

Resultados dos Estudos de Sensibilidade

Capítulo 6 - Resultados dos Estudos de Sensibilidade

6.1 - Análise do Conforto Térmico

6.2 - Caso de Estudo Original

6.2.1 - Comportamento Térmico do Caso de Estudo Original sem Sistema de Ventilação

6.2.1.1 - Estação de Aquecimento – Comportamento Térmico

6.2.1.3 - Estação de Arrefecimento – Comportamento Térmico

6.2.2 - Comportamento Térmico do Caso de Estudo Original com Sistema de Ventilação

6.2.2.3 – Necessidades Energéticas

6.3 - Optimizações – Resultado Estudos Paramétricos

6.3.1 - Avaliação do Conforto Durante a Estação de Aquecimento

6.3.2 - Avaliação do Desconforto Durante a Estação de Arrefecimento

6.3.3 - Necessidades Energéticas

6.4 - Estudos Complementares

6.4.1 - Influência do Comportamental dos Ocupantes na Operacionalidade das Protecções Solares

6.4.2 - Influência do Aumento da Inércia Térmica das Soluções Construtivas no Comportamento Térmico do Edifício

6.5 - Estudos do Desempenho Térmico para Diferentes Regiões

6.5.1 - Escolha das Regiões Representativas do Clima de Portugal

6.5.2 – Necessidades Energéticas

6.5.2.1 - Aveiro

6.5.2.2 - Bragança

6.5.2.3 - Évora

6.5.2.4 - Faro

6.5.3 - Avaliação do Desconforto

6.5.3.1 - Aveiro

6.5.3.2 - Bragança

6.5.3.3 - Évora

6.5.3.4 - Faro

6.6 - Síntese Geral

Capítulo 6 - Resultados dos Estudos de Sensibilidade

6.1 - Análise do Conforto Térmico

O conforto térmico que um edifício proporciona aos seus ocupantes traduz bastante a qualidade do seu ambiente interior. A sua quantificação é difícil dado que não depende apenas de factores quantificáveis (ambientais como a temperatura e velocidade do ar), depende também de factores não quantificáveis (individuais de natureza psicológica e sociológica).

Existem quatro normas que com base em modelos fisiológicos e em diversos estudos efectuados em pessoas e em ambientes térmicos caracterizam o conforto térmico interior. Essas normas são ASHRAE 55 [41], EN 7730 [42], EN 15251 [43] e a norma ISO/TS 14415 [44].

A norma europeia EN 15251 [43]: *Criteria for the indoor environment including thermal, indoor air quality, lighting and noise*, foi a escolhida para quantificar o conforto térmico do edifício, por se identificar bastante com os requisitos essenciais da directiva EPBD [1]. Esta norma regula a qualidade do ambiente interior de edifícios, em termos térmicos, qualidade do ar, iluminação e ruído.

Quanto à quantificação do conforto térmico interior, o modelo adaptativo da norma EN 15251 [43] é válido para espaços sem limitação do número de ocupantes. A expressão adoptada para o cálculo da temperatura operativa de conforto, T_{oc} é estabelecida em função da temperatura média exterior ponderada, T_{mp} , dada pela expressão 13:

$$T_{oc} = 0,33 * T_{mp} + 18.8 \quad (13)$$

T_{oc} – Temperatura operativa de conforto [°C];

T_{mp} – Temperatura média exterior ponderada [°C].

O cálculo da temperatura média exterior ponderada, T_{mp} , é feito com base nos valores das temperaturas médias diárias da semana precedente, definido pela expressão 14:

$$T_{mp} = \frac{(T_{n-1} + 0.8.T_{n-2} + 0.6.T_{n-3} + 0.5.T_{n-4} + 0.4.T_{n-5} + 0.3.T_{n-6} + 0.2.T_{n-7})}{3.8} \quad (14)$$

T_{mp} – Temperatura média exterior ponderada [°C];

T_{n-i} – Temperatura média exterior do dia (i) anterior [°C].

Os ambientes térmicos são classificados numa fase inicial por categorias, consoante o grau de exigência de conforto pretendido para o edifício (ver Tabela 15). As larguras de banda associadas a cada categoria de conforto estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 15 - Descrição das categorias de conforto especificadas - adaptado de [43]

Categoria de Conforto	Descrição
I	Elevado nível de expectativa – é recomendada para espaços ocupados por pessoas muito frágeis e sensíveis com requisitos especiais, como, pessoas incapacitadas fisicamente, doentes, idosos e recém-nascidos;
II	Nível normal de expectativa – edifícios novos e reabilitados
III	Nível aceitável de conforto – edifícios já existentes
IV	Valores fora dos limites de outras categorias – aceite apenas para períodos limitados

Tabela 16 - Largura de banda por categoria de conforto - adaptado de [43]

Categoria de Conforto	Largura de Banda – T_{oc} [°C]
I	+/- 2
II	+/- 3
III	+/- 4

A Figura 46 representa as categorias de conforto, obtidas em função da temperatura operativa de conforto T_{oc} . Essas categorias são obtidas, aplicando as larguras de banda presentes na Tabela 16, a uma linha central definida pela expressão 14:

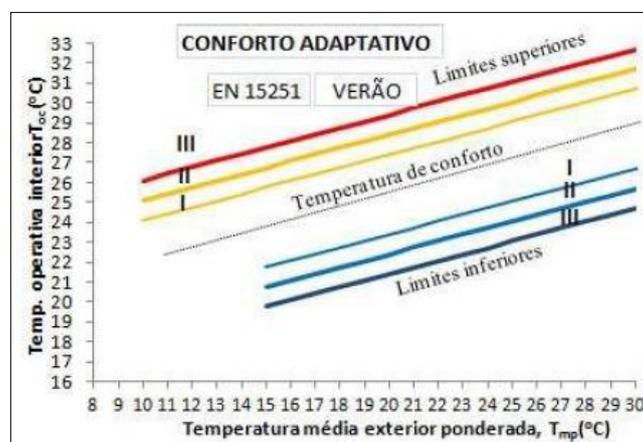


Figura 46 – Valores recomendados da T_{oc} em função T_{mp} período de Verão – adaptado de [42]

No caso do valor da T_{mp} ser inferior a 10°C, a norma recomenda a utilização dos limites superiores de conforto para edifícios com sistema mecânico de aquecimento e arrefecimento presentes na Tabela A.2, do anexo A da norma EN 15251 [43]. Para o cálculo dos limites inferiores de conforto, quando a T_{mp} for inferior a 15°C, utilizam-se os limites inferiores também referidos na Tabela A.2, do anexo A da norma EN 15251 [43]. Nas condições especiais atrás descritas os limites máximos e mínimos aceitáveis são constantes (ver Figura 47).

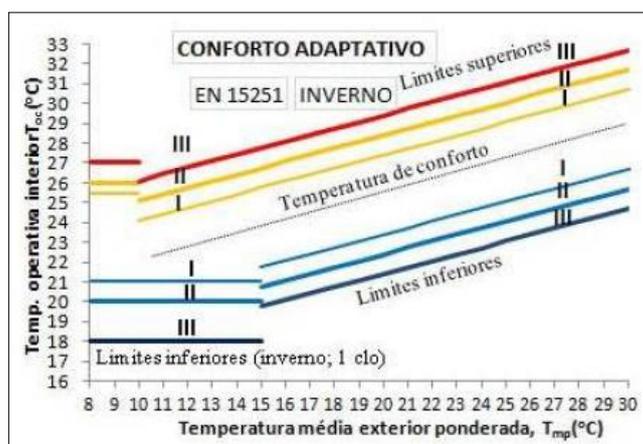


Figura 47 – Valores recomendados da T_{oc} em função T_{mp} período de Inverno – adaptado de [43]

O Anexo A da norma EN 15251 [43], apresenta exemplos de valores de temperatura para projectos de edifícios com sistemas mecânicos de aquecimento e arrefecimento com base nas categorias dos mesmos, ver Tabela 17.

Tabela 17 - Valores de temperaturas de projecto segundo a Norma EN 15251 - adaptado de [43]

Tipo de Edifícios	Categoria de Conforto	Temperatura Operativa [°C]	
		Mín para Aquecimento [°C]	Máx para Arrefecimento [°C]
Edifícios residenciais: zonas úteis (quartos, sala, etc.) Actividade sedentária = 1.2met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	18,0	27,0

Existem valores para outro tipo de compartimentos, para o presente caso de estudo não são importantes

Serão utilizados os gráficos presentes nas Figuras 46 e 47 para a caracterização do modelo original sem sistema mecânico de ventilação. Por se tratar de um edifício novo é classificado como sendo de categoria II.

O modelo original com sistema mecânico de ventilação será classificado para os valores limites de temperatura de conforto de acordo com a Tabela 17.

O conforto será avaliado de mais duas formas distintas. A primeira em que será determinada a percentagem de tempo em que a temperatura no interior de cada zona térmica é inferior e superior aos limites de 20 e 26°C. Com isto pretende-se avaliar de forma mais rigorosa a percentagem de desconforto comparando com a EN 15251 [43]. A segunda forma consiste em determinar o número de graus hora GH acumulados de desconforto. De uma forma simples é determinado o excesso ou défice de graus relativamente aos limites de temperatura de conforto definidos.

6.2 - Caso de Estudo Original

Numa fase inicial será caracterizado o comportamento do caso de estudo original com e sem sistema de ventilação mecânico. Para tornar a análise gráfica mais clara serão seleccionadas quatro zonas térmicas do edifício. Será estudado um dos quartos do 1º Andar e a sala no R/Chão, ambos orientados a Sudoeste. Seleccionaram-se estas zonas térmicas por serem as mais críticas ao nível da exposição solar e pela quantidade de área envidraçada (a cozinha não foi seleccionada pela reduzida área envidraçada que apresenta). Será também estudado o comportamento das duas suites orientadas a Nordeste, uma pertencente ao R/Chão e outra pertencente ao 1º Andar. Estas duas zonas térmicas foram escolhidas devido à sua orientação (reduzida quantidade de ganhos solares).

Para compreender de uma forma mais detalhada o comportamento diário da temperatura no interior de cada zona térmica foram seleccionadas as duas semanas mais severas da estação de aquecimento e as duas semanas mais severas para a estação de arrefecimento. Para isso, foram avaliadas as necessidades de aquecimento e arrefecimento no *EnergyPlus* para o modelo com sistema de ventilação mecânica (ver Figura 48 e Figura 49). Com base nos valores máximos das necessidades energéticas foram seleccionadas duas semanas para cada estação. Os valores apresentados para as necessidades energéticas correspondem ao *setpoint range* de funcionamento de temperatura interior de 20 e 26°C.

Pela análise da Figura 48, foi escolhida a segunda e a terceira semana de Dezembro para a estação de aquecimento.

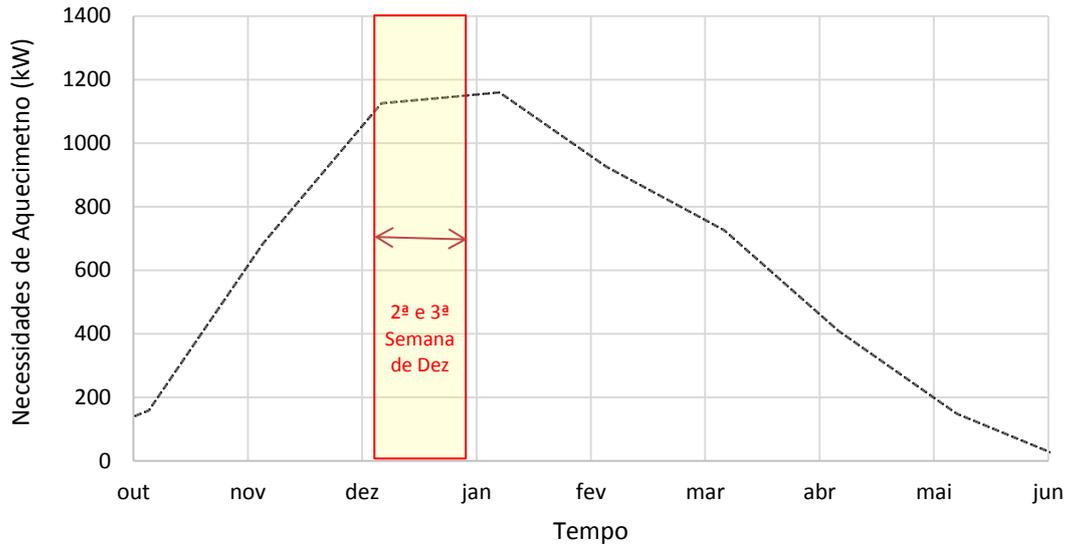


Figura 48 – Valores das necessidades de aquecimento do edifício original (*Setpoint* = 20°C)

Pela análise da Figura 49, foi escolhida a última semana de Agosto e a primeira semana de Setembro para a estação de arrefecimento.

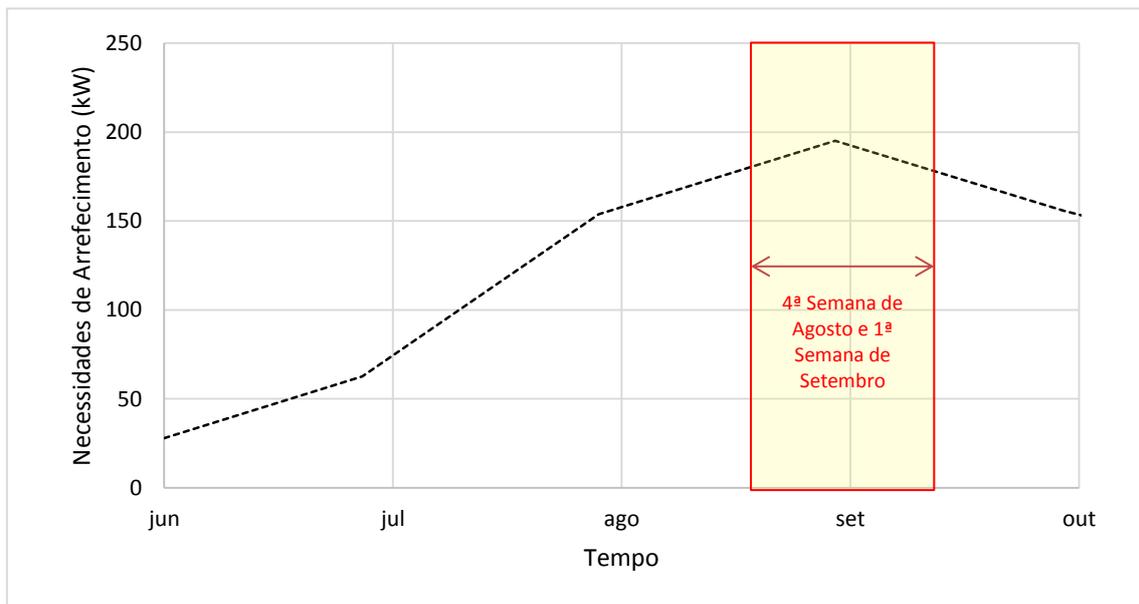


Figura 49 – Valores das necessidades de arrefecimento do edifício original (*Setpoint* = 26°C)

6.2.1 - Comportamento Térmico do Caso de Estudo Original sem Sistema de Ventilação

Na Figura 50 é apresentada a variação da temperatura horária para as zonas térmicas seleccionadas e representativas do comportamento do edifício para um período anual.

O quarto individual no 1º Andar, como espectável, devido à elevada área envidraçada e à baixa massa superficial das superfícies interiores apresenta picos de temperatura

elevadíssimos. A suite do R/Chão é a zona térmica com a curva de temperatura mais baixa devido à sua orientação não proporcionar uma elevada quantidade de ganhos solares. A sala é a zona térmica que apresenta um comportamento mais regular devido à sua elevada volumetria.

O elevado número de horas que a temperatura é superior ao limite de conforto, 26°C na estação de aquecimento está directamente relacionado com os horários de funcionamento dos sistemas de protecção solar e a definição das estações de aquecimento/arrefecimento. Considerou-se para o período de aquecimento os meses de Junho a Setembro e para o período de arrefecimento de Outubro a Maio. Como já foi explicado no capítulo 5 os horários dos sistemas de protecção solar no Inverno funcionam de modo a tirar partido dos ganhos solares, estando abertos durante o período diurno. O que acontece é que durante os meses de Abril e Outubro, ainda existem dias muito quentes, temperaturas médias diárias elevadas. Como as persianas exteriores estão abertas durante todo o período diurno, por ser considerado que esses meses pertencem à estação de Inverno, conduzem a ganhos solares excessivos provocando o sobreaquecimento de determinadas zonas térmicas.

Pela análise da Figura 50 facilmente se conclui que o edifício original necessita de ser optimizado dado que apresenta um elevadíssimo número de horas em que as temperaturas interiores estão fora do limite de conforto ($20^{\circ}\text{C} < T_{\text{conforto}} < 26^{\circ}\text{C}$).

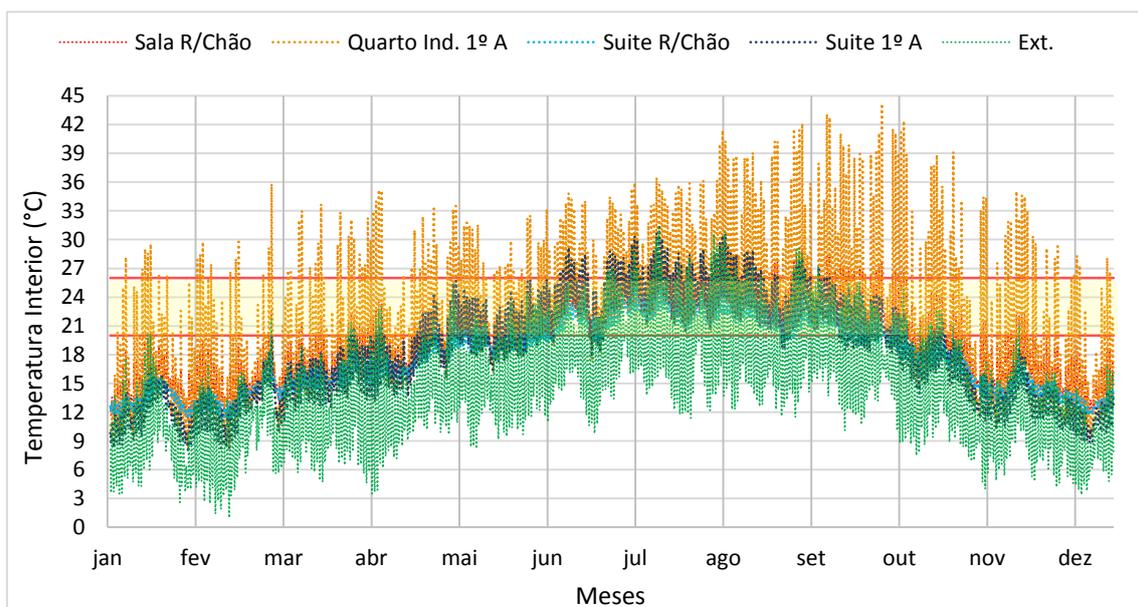


Figura 50 - Variação da temperatura anual do caso de estudo original

6.2.1.1 - Estação de Aquecimento – Comportamento Térmico

Na Figura 51 é apresentado o comportamento térmico das mesmas zonas térmicas durante a 2ª e a 3ª semana de Setembro. O quarto individual do 1º Andar, por pertencer à fachada orientada a Sudoeste com aproximadamente 60% de área envidraçada, comparativamente às restantes zonas térmicas é a que se encontra mais tempo dentro dos limites de conforto. É também a zona térmica com maiores amplitudes térmicas entre o período diurno e nocturno atingindo diferenças de 13º C. A zona térmica da sala no R/Chão apesar de também estar sujeita a radiação solar, a sua volumetria é muito superior, dado que inclui o hall de entrada e o corredor de circulação até ao 1º Andar. Os compartimentos orientados a Nordeste apresentam temperaturas muito abaixo do limite mínimo da temperatura de conforto ($T = 20^{\circ}\text{C}$).

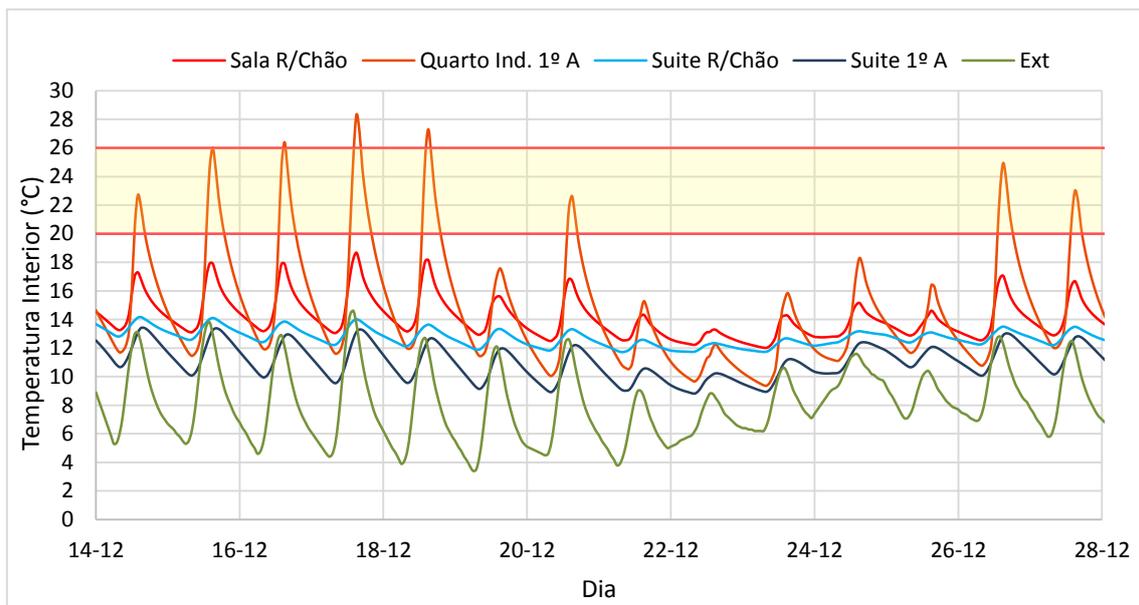


Figura 51 - Variação da temperatura durante a estação de aquecimento do caso de estudo original de 14/12 a 28/12

Na Figura 52, é apresentado a probabilidade cumulativa da temperatura interior das zonas térmicas representativas do edifício. Na estação mais fria a temperatura exterior varia entre 2 e 24°C. Pode-se concluir pela análise da Figura 52 que o quarto individual do 1º Andar é a zona térmica mais sensível à variação da temperatura exterior. O valor mínimo da temperatura do ar dentro dessa zona é de 8°C e o valor máximo é de 42°C. As restantes zonas térmicas apresentam um comportamento mais regular com uma diferença mínima para a temperatura exterior de aproximadamente 3°C. Em 50% do tempo total da estação de aquecimento a temperatura exterior é de aproximadamente

8°C e todos os compartimentos apresentam uma diferença mínima para o exterior de aproximadamente 4°C.

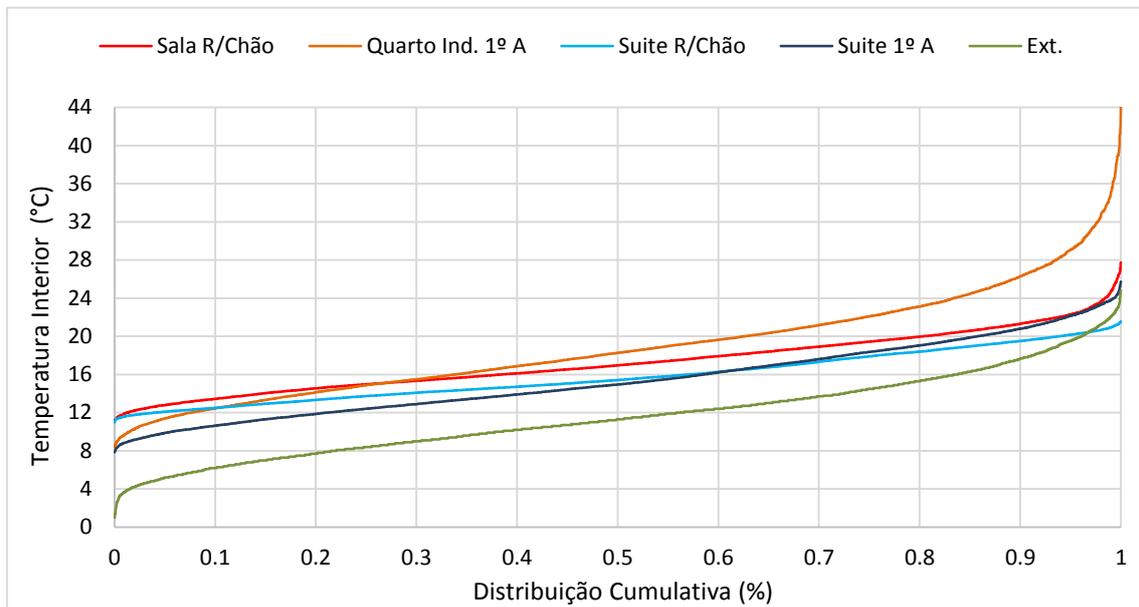


Figura 52 – Distribuição cumulativa da temperatura durante a estação de aquecimento

Na Figura 53 é apresentada a variabilidade da temperatura para 3 zonas térmicas do edifício pertencentes ao 1º Andar durante a estação de aquecimento (foi feita a média das temperaturas dos quartos individuais orientados a Nordeste por apresentarem um comportamento térmico muito semelhante e foram posteriormente comparados com a suite do 1º Andar orientada a Sudoeste). Apesar das zonas térmicas apresentarem uma tendência de temperatura semelhante, nos quartos individuais, os valores mínimos e máximos de temperatura bem como as amplitudes térmicas são significativamente superiores à suite, devido à sua orientação e quantidade de área envidraçada. Ambas as zonas térmicas apresentam elevados níveis de desconforto, pela forma como as temperaturas estão dispersas. Para um melhor entendimento deste tipo de gráficos um quartil é qualquer um dos três valores que divide o conjunto ordenado de dados em quatro partes iguais, e assim cada parte representa $\frac{1}{4}$ da amostra ou população).

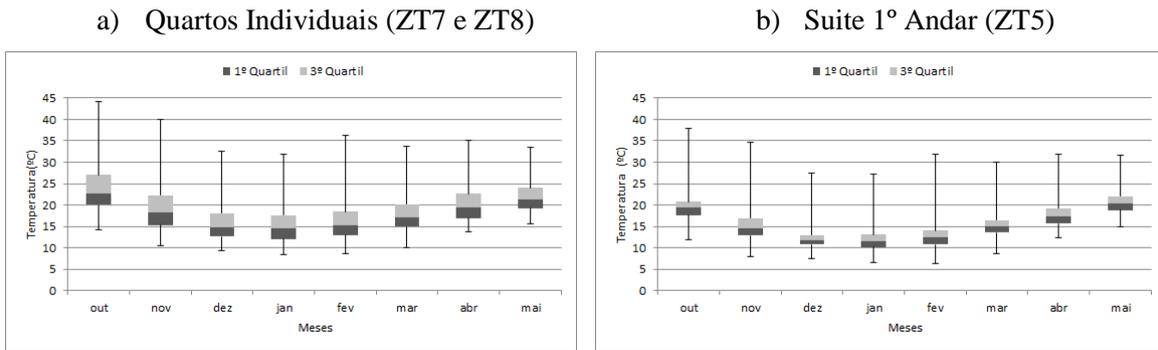


Figura 53 – Distribuição da temperatura interior durante a estação de aquecimento

6.2.1.3 - Estação de Arrefecimento – Comportamento Térmico

Na Figura 54 é apresentado o comportamento térmico das mesmas zonas térmicas entre 25 de Agosto e 09 de Setembro. A zona térmica do quarto individual do 1º Andar continua a apresentar uma elevada percentagem de desconforto, pela mesma razão referida anteriormente, isto é, elevada área envidraçada e reduzida massa superficial das soluções construtivas. O valor da amplitude térmica entre o período diurno e nocturno é superior ao da estação de aquecimento, atingindo valores de aproximadamente 19°C. A zona térmica da sala no R/Chão e da suite do 1ºAndar apresentam um comportamento bastante semelhante ultrapassando o limite superior de conforto durante períodos muito curtos. A suite R/Chão é a única zona térmica que nunca ultrapassa o limite superior de conforto. É também o compartimento que consegue ter uma temperatura interior inferior à temperatura exterior, isto é possível devido à sua orientação Nordeste e reduzida quantidade de área envidraçada. A suite do 1ºAndar consegue ter uma curva de temperatura superior à do R/Chão porque para uma volumetria aproximadamente igual, apresenta uma área envidraçada consideravelmente superior. Pela análise da Figura 54, facilmente se constata que uma grande parte dos valores das necessidades de arrefecimento estão directamente relacionados com o arrefecimento dos dois quartos orientados a Sudoeste.

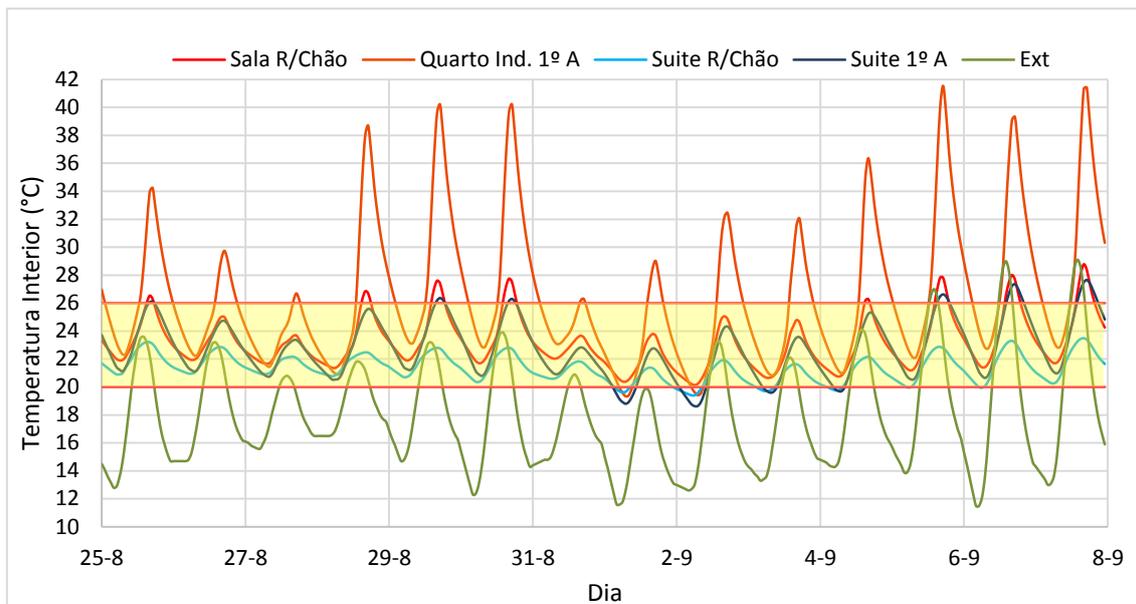


Figura 54 - Variação da temperatura durante a estação de arrefecimento do caso de estudo original de 25/8 a 8/9

Na Figura 55, é apresentado a probabilidade cumulativa da temperatura interior das zonas térmicas representativas do edifício. Na estação mais quente a temperatura exterior varia entre 10 e os 30°C. O quarto individual como espectável é também a zona térmica mais sensível à variação da temperatura exterior. O valor mínimo da temperatura do ar dentro dessa zona é de 18°C e o valor máximo é de 43°C. Existe uma tendência clara nas curvas de temperatura, em que quanto maior é o valor da temperatura exterior, menor é a diferença entre a temperatura dos compartimentos e o exterior (excepto na sala do R/Chão).

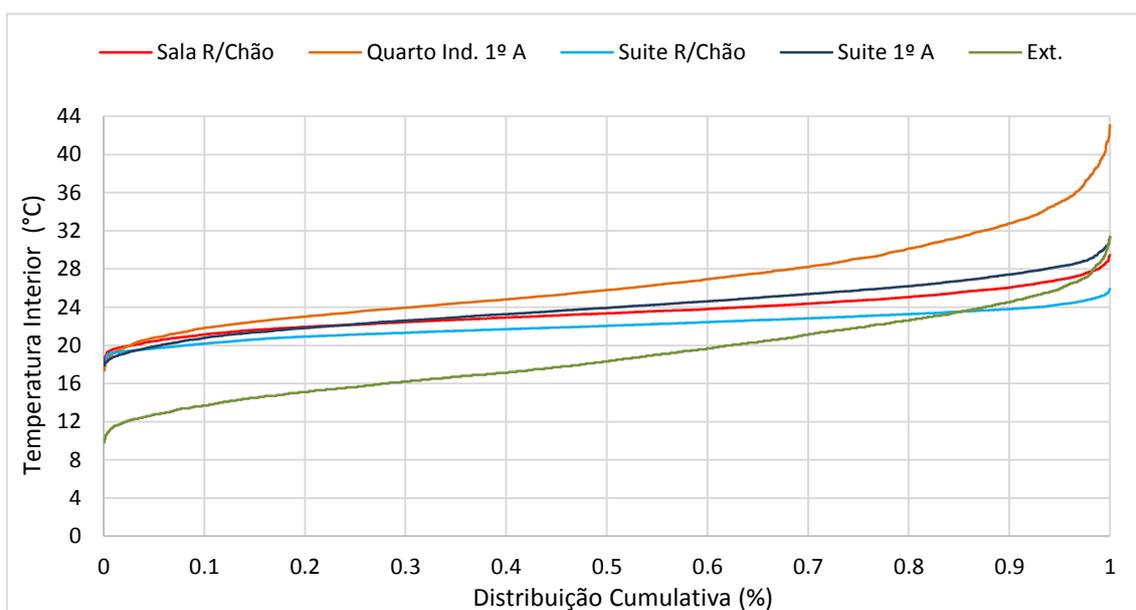


Figura 55 – Distribuição cumulativa da temperatura durante a estação de arrefecimento

Na Figura 56 é apresentada a variabilidade da temperatura para 3 zonas térmicas do edifício durante a estação de arrefecimento. Os quartos individuais à semelhança do que aconteceu na estação de aquecimento, apresentam temperaturas máximas e mínimas significativamente superiores à suite. Estes compartimentos apresentam também um elevado desconforto durante a estação de arrefecimento. A suite devido à sua orientação Nordeste, durante os meses de Junho, Julho e Setembro, sem sistema activo de climatização as temperaturas interiores dos compartimento do edifício estão dentro dos limites de conforto ($20^{\circ}\text{C} < T < 26^{\circ}\text{C}$) em 50% dos respectivos períodos mensais.

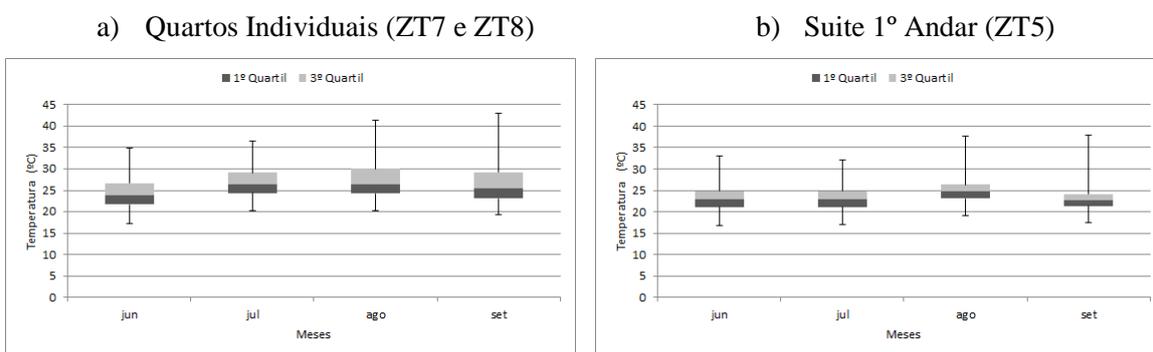


Figura 56 – Distribuição da temperatura interior durante a estação de arrefecimento

6.2.2 - Comportamento Térmico do Caso de Estudo Original com Sistema de Ventilação

Na Figura 57 é apresentada a variação da temperatura horária para as zonas térmicas estudadas, com a utilização de um sistema de ventilação mecânico para um período anual. Foi adicionado um *setpoint range* a cada zona térmica por forma a garantir os valores limite de temperatura de conforto entre 20 e 26°C. Como se pode verificar, mesmo com temperaturas exteriores a abaixo e acima dos limites de conforto, a temperatura no interior dos compartimentos nunca ultrapassa o *setpoint range* definido.

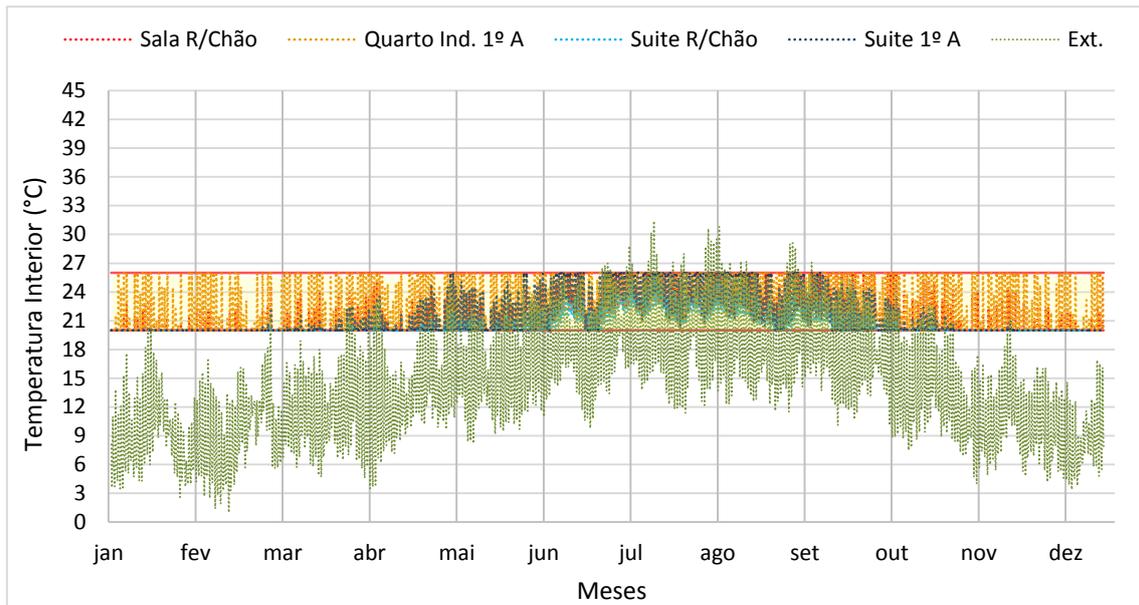


Figura 57 - Variação da temperatura anual do caso de estudo original com sistema HVAC

Na Figura 58 é apresentado o comportamento individualizado das zonas térmicas para cada estação aquecimento/arrefecimento com o sistema de ventilação mecânica. Como espectável as temperaturas interiores estão todas dentro dos limites de conforto independente do valor da temperatura exterior.

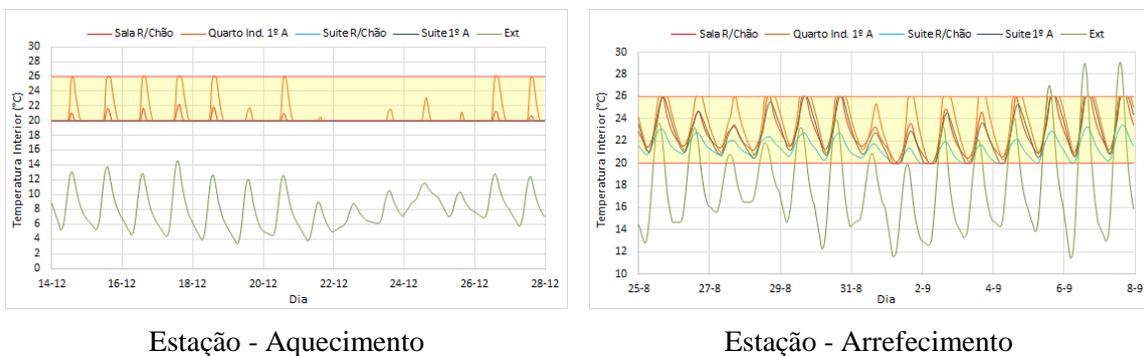


Figura 58 – Variação da temperatura durante a estação de aquecimento e arrefecimento do edifício original com sistema HVAC

6.2.2.3 – Necessidades Energéticas

Na Figura 59 são apresentados os valores das necessidades energéticas do edifício original para o *setpoint range* de temperatura interior de 20 a 26°C. Devido ao valor das necessidades de aquecimento e o valor total da energia primária, o edifício não pode ser considerado *Passive House*. Para além das elevadas necessidades energéticas, este edifício, apresenta uma elevada percentagem de sobreaquecimento. Torna-se necessário desta forma proceder ao conjunto de optimizações atrás descritas.

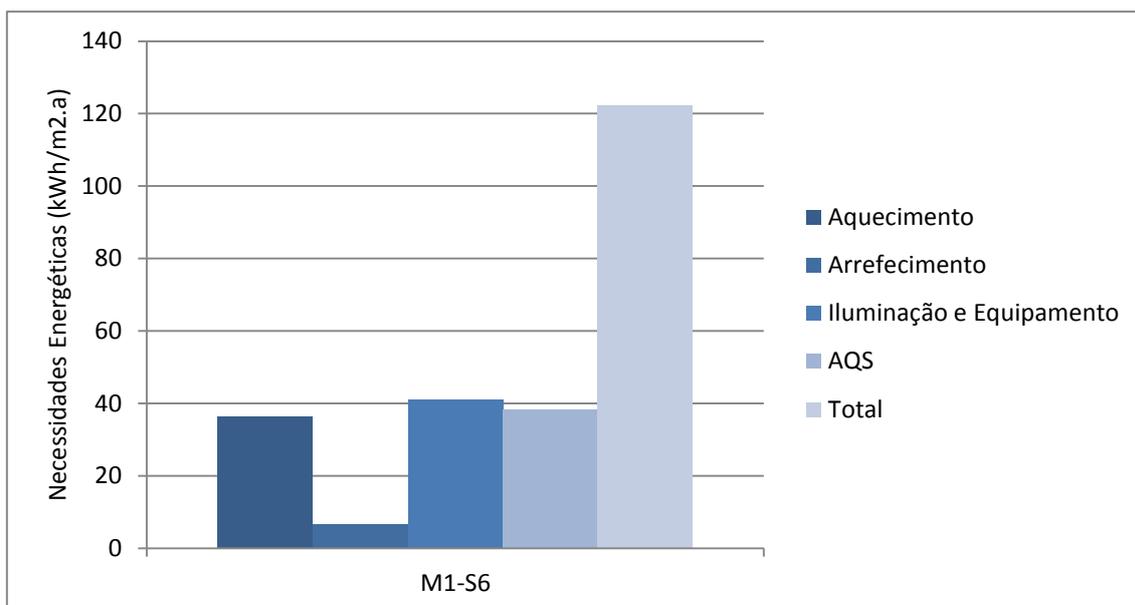


Figura 59 – Necessidades energéticas do edifício original com sistema HVAC

6.3 - Optimizações – Resultado Estudos Paramétricos

Um dos maiores desafios em adaptar o conceito *Passive House* aos países situados no Sul da Europa é evitar o sobreaquecimento, a optimização dos modelos teve uma vertente bastante mais forte ao nível da estação de arrefecimento por essa mesma razão. Depois da simulação dos 96 modelos foram seleccionados 4 como representativos de cada estação (ver Tabela 18 e Tabela 19). Todos os valores de temperatura máximos e mínimos apresentados nas tabelas referem-se aos modelos sem sistema de ventilação mecânico.

Para a estação de aquecimento (ver Tabela 18), foram seleccionados 3 modelos do tipo M1 em que se tentaram obter valores reduzidos de necessidades de aquecimento, aumentando a espessura do isolamento térmico para verificar se seria dispensável a utilização de um sistema de ventilação com recuperação de calor. O que se verificou numa fase inicial é que mesmo com a utilização das espessuras máximas de isolamento não é possível obter necessidades de aquecimento inferiores ao exigido pela *Passive House* 15 kWh/m².a. Escolheu-se então um quarto modelo com sistema de ventilação com recuperação de calor do tipo M2. Optou-se nestas combinações pela não utilização das espessuras máximas de isolamento, e sim os níveis intermédios, para adaptar de alguma forma o conceito *Passive House* à realidade construtiva Portuguesa. É possível verificar através da Tabela 18, que o valor das necessidades de aquecimento diminuiu com o aumento da espessura de isolamento, obtendo-se uma redução máxima de 26% em relação à solução original. Com a utilização do permutador de fluxos cruzados e

com os níveis de isolamento máximos, a redução passou para os 62%. Refere-se ainda que as temperaturas mínimas aumentaram de forma ligeira com o aumento da espessura do isolamento.

Tabela 18 - Modelos representativos para avaliar a estação de aquecimento

Nº Simulação	Necessidades Energéticas de Aquecimento [kWh/m ² .a]	T _{min} [°C]				
		Sala R/Chão	Quarto Individual 1º A	Suite R/Chão	Suite 1º A	
M1-S6		36,26	11,13	8,40	10,99	7,86
M1-S13		31,32	11,14	8,44	10,61	8,21
M1-S21		26,74	11,35	9,38	10,52	8,66
M2-S13		13,72	11,35	9,38	10,52	8,66

Para a estação de arrefecimento, (ver Tabela 19) foram selecionados 2 modelos do tipo M1 (com sistema de HVAC comum), sendo a maior preocupação nestes casos, não a de obter valores reduzidos de necessidades energéticas, mas sim diminuir o risco de sobreaquecimento. Verificou-se que alterando a espessura de isolamento e utilizando o sistema automático de fecho de persianas, foi possível reduzir significativamente o valor máximo das temperaturas. Foi também escolhido um modelo do tipo M2 (ventilação natural nocturna) com a solução intermédia de espessuras de isolamento, estudando desta forma uma vertente mais passiva com um valor nulo de necessidades energéticas

de arrefecimento. O último modelo escolhido foi do tipo M3 (com bypass), também para uma solução intermédia de espessuras de isolamento, em que a temperatura interior é 100% controlada pelo sistema de ventilação mecânica. Os três últimos modelos apresentam percentagens de sobreaquecimento muito baixas, sendo possível desta forma optar pela solução mais adequada à realidade construtiva Portuguesa.

É de referir que as necessidades de arrefecimento para os modelos do tipo M3, referem-se apenas ao consumo do aparelho em modo *bypass*.

Tabela 19 - Modelos representativos para avaliar a estação de arrefecimento

Nº Simulação	Necessidades Energéticas de Arrefecimento [kWh/m ² .a]	T _{máx} [°C]			
		Sala R/Chão	Quarto Individual 1º A	Suite R/Chão	Suite 1º A
M1-S6	6,64	29,44	43,08	25,89	31,33
M1-S13	0,38	25,29	33,56	25,65	29,36
M2-S13	0,00	28,57	32,03	28,78	30,14
M3-S13	0,97	25,32	33,54	25,68	29,37

6.3.1 - Avaliação do Conforto Durante a Estação de Aquecimento

Na Figura 60 é apresentada a análise de conforto entre o modelo M1-S6 e o modelo M1-S13 da Tabela 18 para a estação de aquecimento de acordo com a EN 15251 [43]. Os dois gráficos do lado esquerdo correspondem aos compartimentos orientados a

Sudoeste e os dois do lado direito orientados a Nordeste. Pela análise da Figura 60 conclui-se que efectivamente o aumento de espessuras de isolamento é praticamente inconsequente ao nível da temperatura interior. A zona térmica da sala no R/Chão e do quarto individual no 1º Andar, devido à sua orientação Sudoeste, são os compartimentos que durante mais tempo estão dentro dos limites de conforto. A suite R/Chão é a zona térmica com o pior comportamento em termos de conforto devido à sua orientação Nordeste e reduzida área envidraçada.

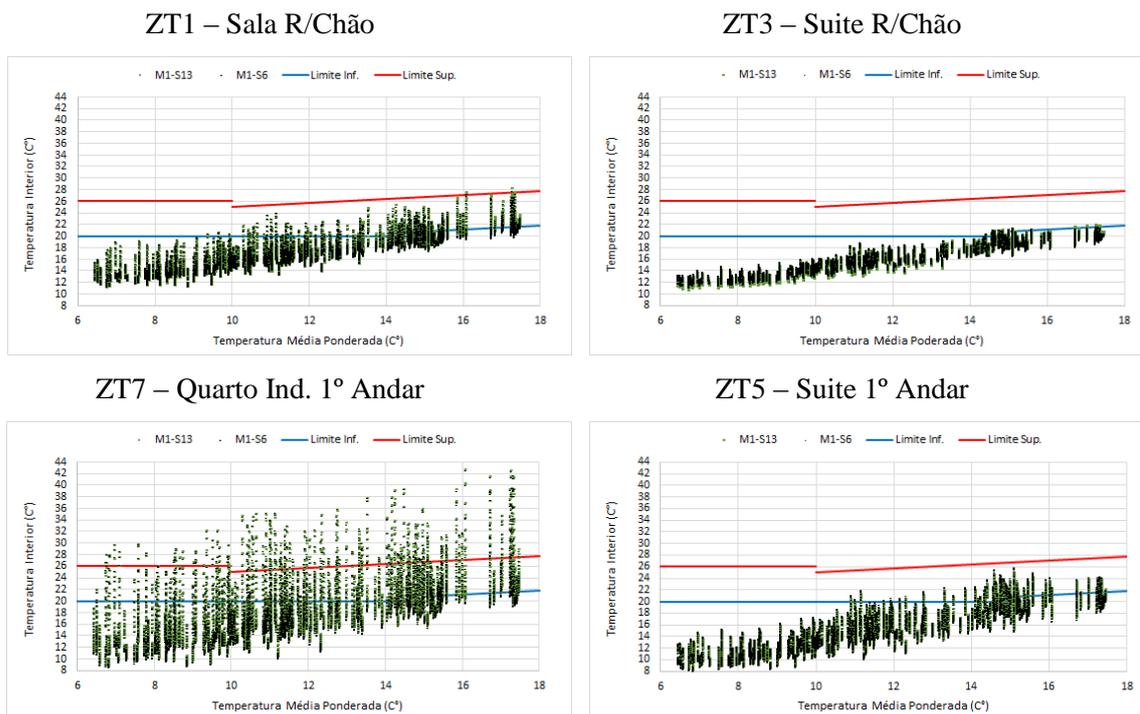


Figura 60 – Análise do conforto segundo EN15251 [43] para a estação de aquecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M1-S13

Na Figura 61 é apresentada a análise de conforto entre o modelo M1-S6 e o modelo M1-S21 da Tabela 18 para a estação de aquecimento de acordo com a EN 15251 [43]. Aqui é comparada a utilização da solução de espessuras de isolamento mais reduzida com a solução de espessuras mais elevada. Constata-se uma subida ligeira dos valores da temperatura, mas mais uma vez, não existe uma alteração significativa a nível global do comportamento interior. Conclui-se desta forma que o aumento da espessura do isolamento por si só não é suficiente para atingir os limites de conforto. No entanto, esse mesmo aumento teve algum impacto nas necessidades de aquecimento do edifício. É evidente desta forma a necessidade de utilização de um sistema de ventilação com recuperação de calor, que potencie a escolha de espessuras de isolamento superiores.

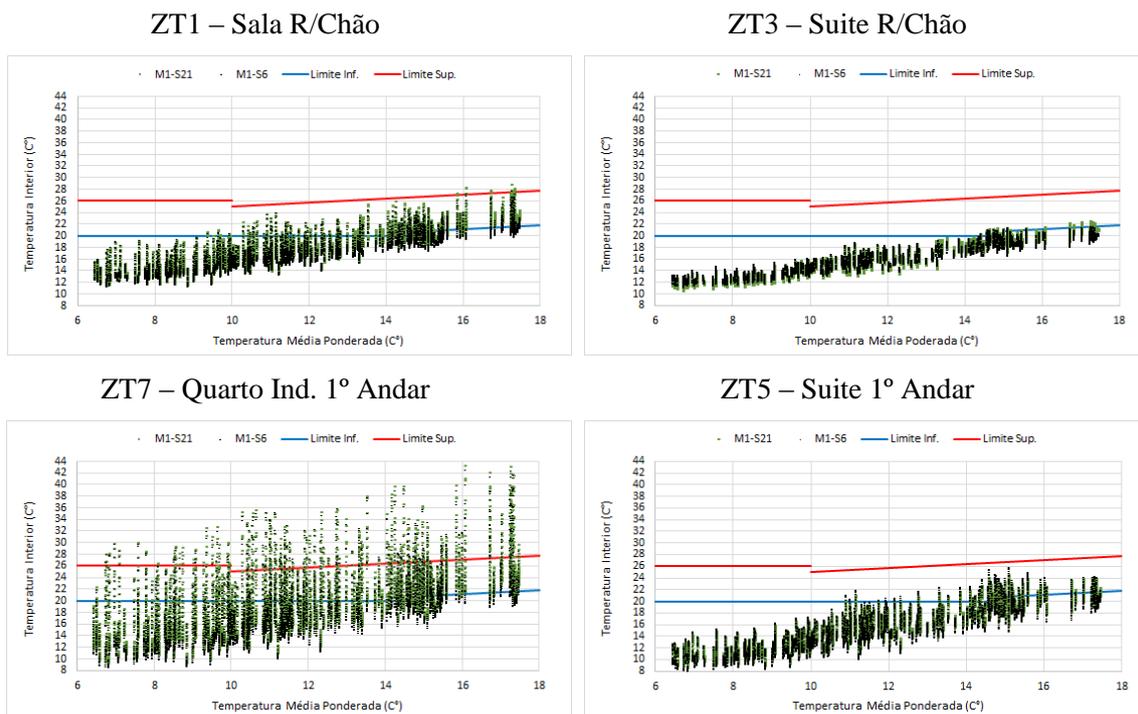


Figura 61 – Análise de conforto segundo EN15251 [43] para a estação de aquecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M1-S21

Na Figura 62 é apresentada a análise de conforto entre o modelo M1-S6 e o modelo M2-S13 da Tabela 18 para a estação de aquecimento de acordo com a EN 15251 [43]. Perante a utilização de um sistema de ventilação mecânica como já foi explicado no enquadramento do presente capítulo os limites de conforto foram fixos nos 20 e 26°C, pela escolha da categoria do edifício do tipo II. Como era espectável, todos os compartimentos apresentam temperaturas superiores ao limite inferior da temperatura de conforto. Como o sistema de ventilação com recuperação de calor é programado de forma distinta para o período de aquecimento e arrefecimento, isto é, o sistema desempenha apenas uma função de cada vez. Devido a este princípio e ao que já foi explicado relativamente à definição dos horários de funcionamento dos sistema de protecção solar e à definição das estações de aquecimento e arrefecimento, verifica-se que o quarto individual no 1º Andar e a sala no R/Chão ultrapassam o limite superior de conforto 26°C durante a estação de aquecimento. As restantes zonas térmicas, suite R/Chão e suite 1ºAndar, encontram-se dentro dos limites de conforto durante toda a estação de aquecimento.

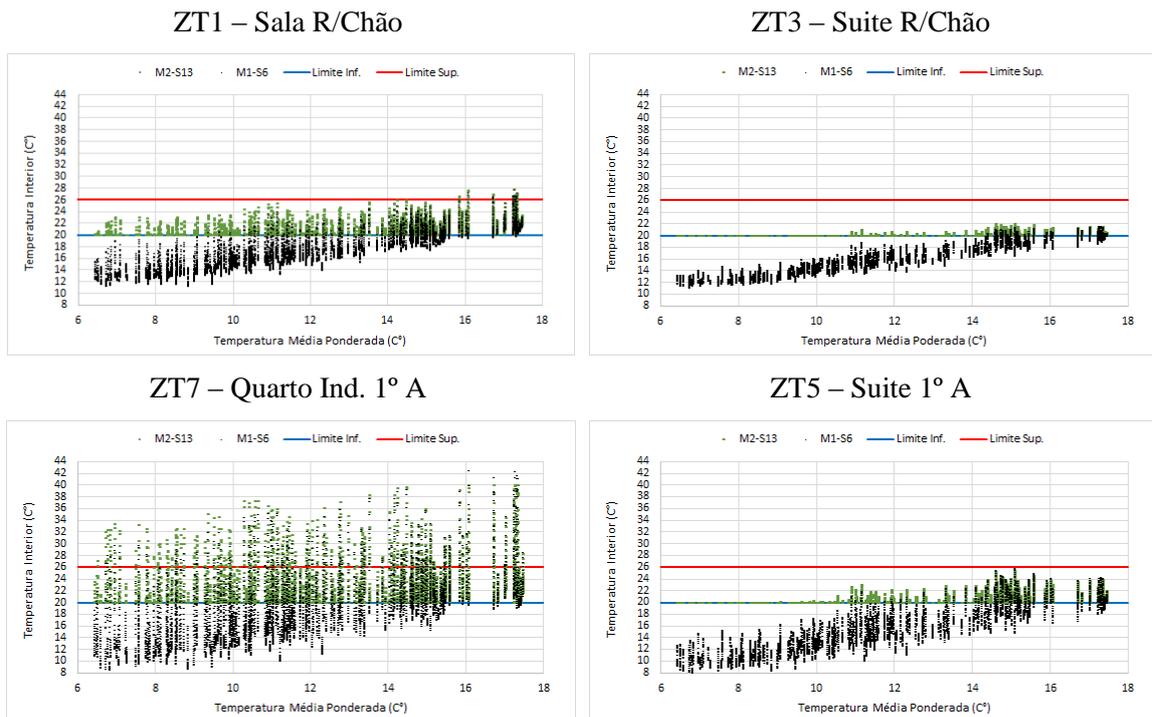


Figura 62 – Análise de conforto segundo EN15251 [42] para a estação de aquecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M2 -S13

Na Figura 63 é apresentado de forma resumida as percentagens de desconforto para a estação de aquecimento segundo dois critérios: a norma EN 15251 [43] e o limite inferior de conforto de 20°C. Verifica-se que devido à categoria escolhida para o edifício, os valores de desconforto obtidos são bastante semelhantes segundo os dois critérios. No entanto, a EN 15251 [43] apresenta valores ligeiramente superiores ao limite inferior de 20°C, sendo desta forma mais exigente. Devido à tipologia construtiva do presente caso de estudo, construção metálica, com uma elevada quantidade de área envidraçada e reduzida inércia térmica, conclui-se que o comportamento do edifício na estação de aquecimento não é eficiente. É impensável atingir o limite inferior de conforto sem o recurso a um sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor. Conclui-se também que a percentagem de desconforto mais elevada pertence à zona térmica da suite R/Chão, com o valor máximo de 98%. A percentagem de desconforto mais reduzida é relativa ao quarto individual 1º Andar, de aproximadamente 60%.

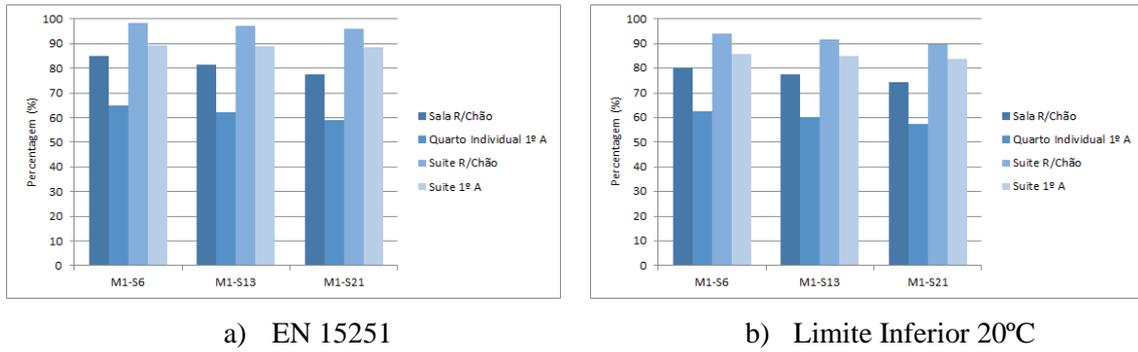


Figura 63 – Percentagem de desconforto para a estação de aquecimento, entre a) EN 15251 [43] e b) limite inferior de 20°C

Na Figura 64 é apresentado o nível de desconforto de outra forma: acumulação de graus hora. O eixo das ordenadas representa o somatório do número de graus hora abaixo do limite inferior de conforto durante toda a estação de aquecimento. Apesar da suite do 1º Andar apresentar percentagens de desconforto inferiores à suite do R/Chão (ver Figura 63), é o compartimento mais desconfortável devido ao número de GH (ver Figura 64). Isto significa que é a zona térmica que apresenta temperaturas mais baixas. O quarto individual no 1º Andar e a sala no R/Chão são os compartimentos com o menor número de graus hora de desconforto. Como era expectável, à medida que se aumenta a espessura de isolamento de modelo para modelo o número de graus hora de desconforto diminui.

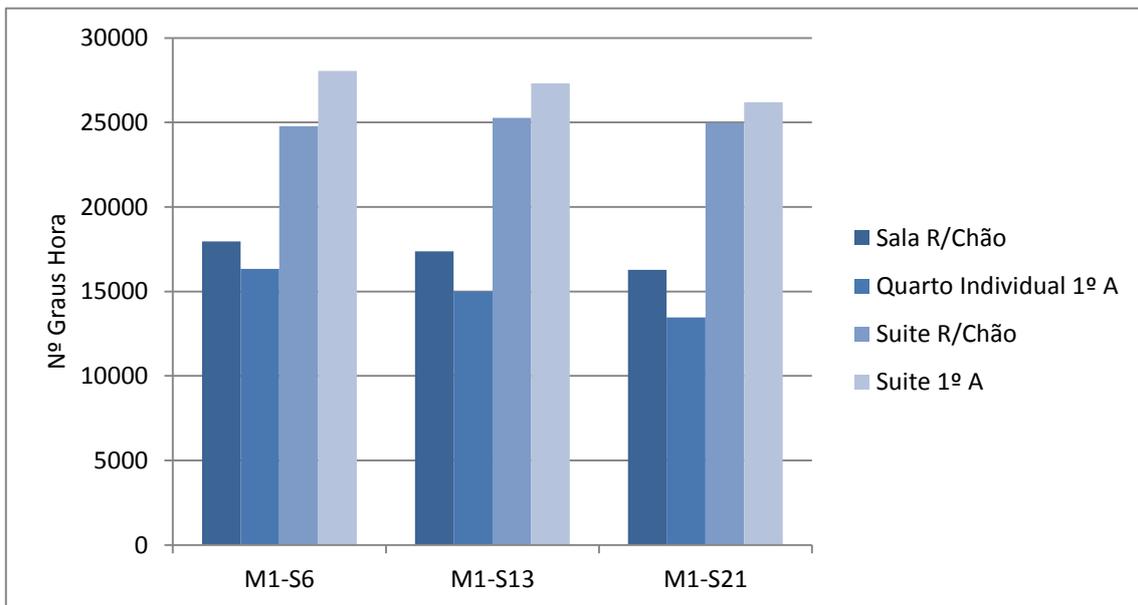


Figura 64 - Percentagem de desconforto para a estação de aquecimento medida em graus hora, entre os modelos M1-S6, M1-S13 e M1-S21

6.3.2 - Avaliação do Desconforto Durante a Estação de Arrefecimento –

Na Figura 65 é apresentada a análise de conforto entre o modelo M1-S6 e o modelo M1-S13 da Tabela 19 para a estação de arrefecimento de acordo com a EN 15251 [43]. Pela análise da Figura 65 conclui-se que a suite do R/Chão nunca ultrapassa o limite superior de conforto. A sala é uma das zonas térmicas em que através da utilização de sistemas de protecção solar de fecho automático deixou de ter problemas de sobreaquecimento. Na suite do 1º Andar é notória a redução do valor de sobreaquecimento, tornando-se quase nulo. O maior impacto como era espectável ocorreu no quarto individual no 1º Andar orientado a Sudoeste com uma redução muito significativa dos níveis de sobreaquecimento. Conclui-se também que o sistema de protecção solar automático poderia ser dispensável para a zona térmica da suite do R/Chão e até mesmo para a sala no R/Chão.

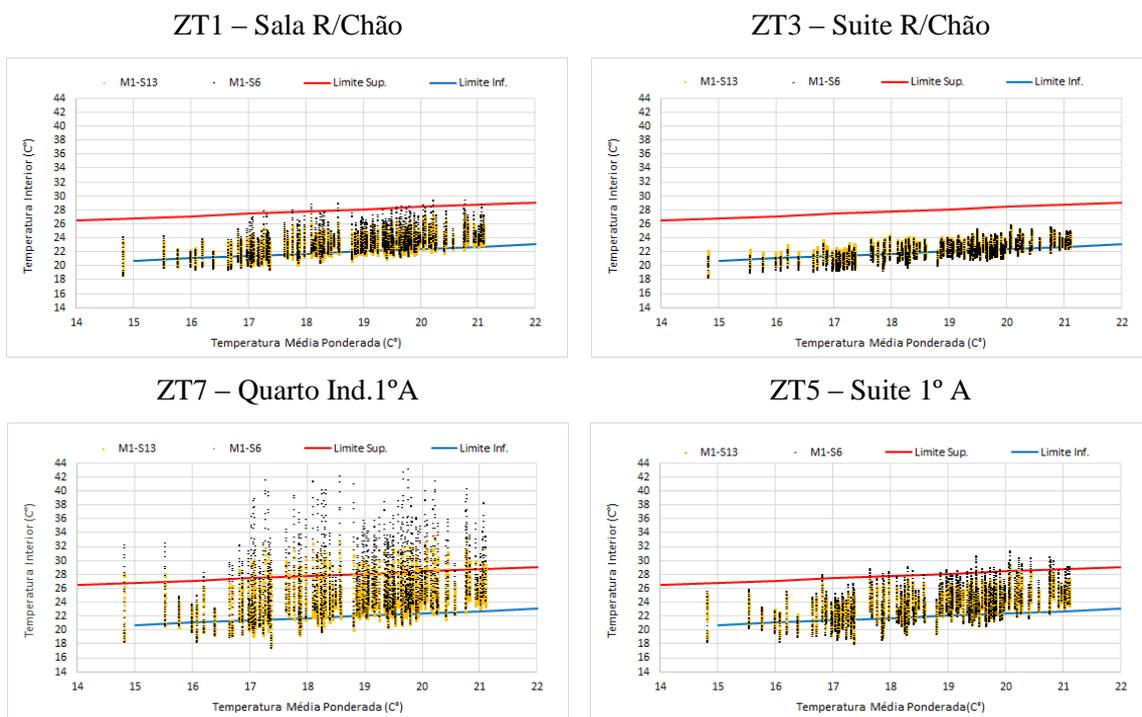


Figura 65 – Análise de conforto segundo EN15251 [43] para a estação de arrefecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M1-S13

Na Figura 66 é apresentada a análise de conforto entre o modelo M1-S6 e o modelo M2-S13 da Tabela 19 para a estação de arrefecimento de acordo com a EN 15251 [43]. Pela comparação destes dois modelos verifica-se que o nível de sobreaquecimento é reduzido de forma significativa. Isto significa que a abertura de janelas durante o período nocturno provoca taxas de renovação de ar elevadíssimas. A maior vantagem

desta solução é a de que não seria necessário qualquer tipo de estratégia mecânica para resolver os problemas de sobreaquecimento. Como se pode observar na Figura 66, praticamente apenas o quarto individual ultrapassa o limite superior de conforto. As zonas térmicas da suite do 1ºAndar e da sala no R/Chão raramente ultrapassam o valor limite superior de conforto. A suite do R/Chão apresenta temperaturas muito baixas, não sendo favorável a realização de ventilação nocturna.

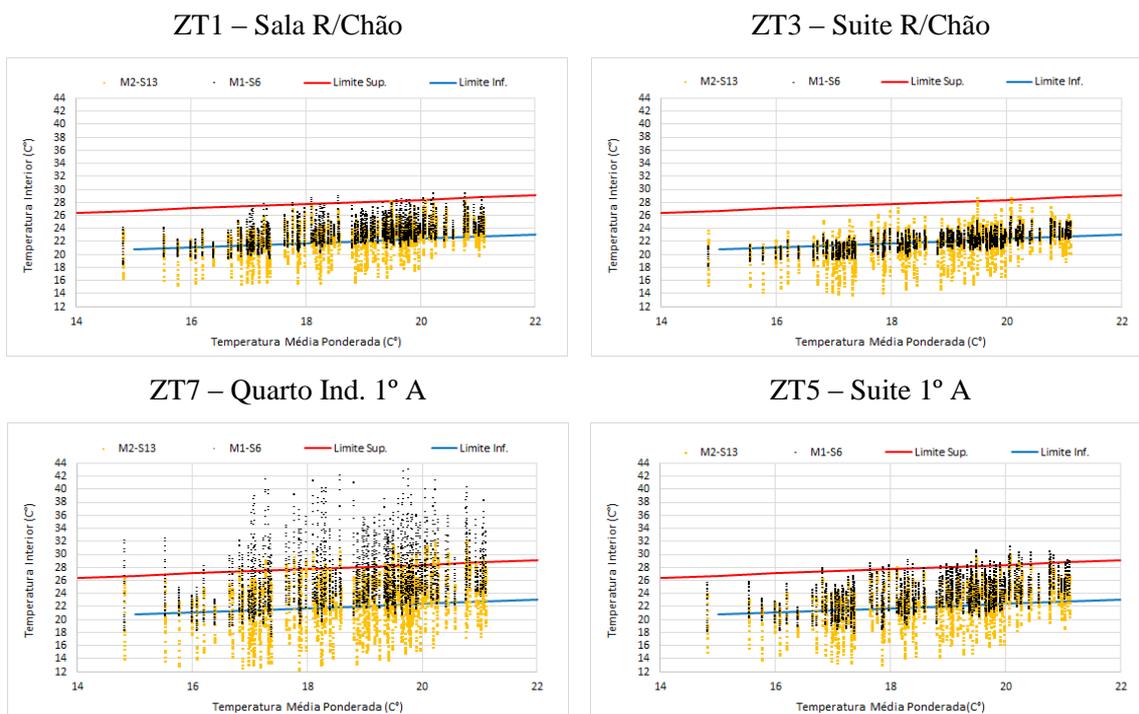


Figura 66 – Análise de conforto segundo EN15251 [43] para a estação de arrefecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M2-S13

Na Figura 67 é apresentada a análise de conforto entre o modelo M1-S6 e o modelo M3-S13 da Tabela 19 para a estação de arrefecimento de acordo com a EN 15251 [43]. Perante a utilização de um sistema de ventilação mecânico os limites de foram fixados nos 20 e 26°C, devido à categoria de conforto do edifício ser do tipo II. No entanto, em vez de um sistema comum de HVAC, neste modelo o sistema de ventilação apenas realiza *bypass* e garante o número de renovações de ar em cada zona térmica. Isto significa, que não é definido um *setpoint range* específico, podendo desta forma o limite superior de conforto ser ultrapassado.

Pela análise da Figura 67 conclui-se que a zona térmica da suite R/Chão nunca ultrapassa o limite superior de conforto. O risco de sobreaquecimento da sala do R/Chão e da suite do 1ºAndar diminuiu à semelhança do M1-13. O maior impacto ocorreu mais

uma vez no quarto individual no 1º Andar orientado a Sudoeste com uma redução significativa dos níveis de sobreaquecimento.

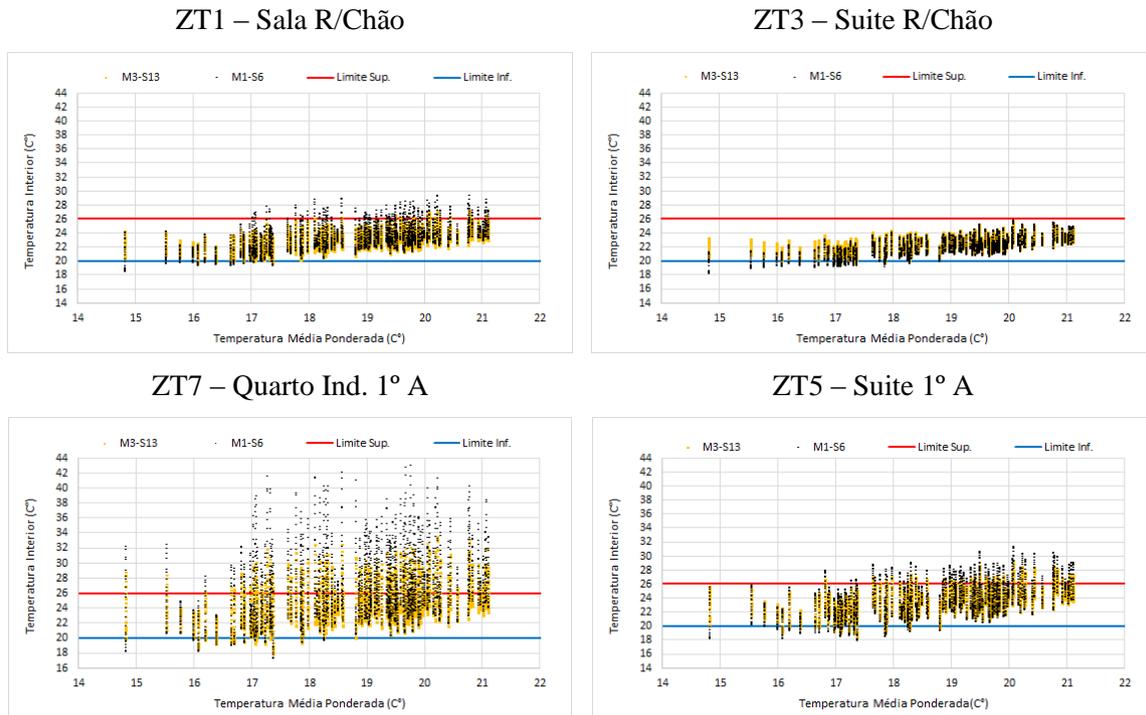


Figura 67 – Análise de conforto segundo EN15251 [43] para a estação de arrefecimento, comparação entre o modelo M1-S6 e o modelo M3-S13

Na Figura 68 são apresentadas as percentagens de desconforto para a estação de arrefecimento segundo a norma EN 15251 [43] e o limite superior de conforto de 26°C. Ao contrário do que se verificou na estação de aquecimento, a EN 15251 [43] não é tão exigente como o limite superior de conforto definido, apresentando um elevado nível de eficácia durante a estação de arrefecimento. Segundo a EN15251 [43], conclui-se desta forma que é possível atingir condições interiores de conforto sem o recurso a sistemas de HVAC tradicionais. Através da Figura 68 verifica-se que a percentagem de desconforto mais elevada corresponde ao quarto individual no 1º Andar, não ultrapassando o valor máximo de 50%. A zona térmica da suite do R/Chão apresenta valores nulos de desconforto.

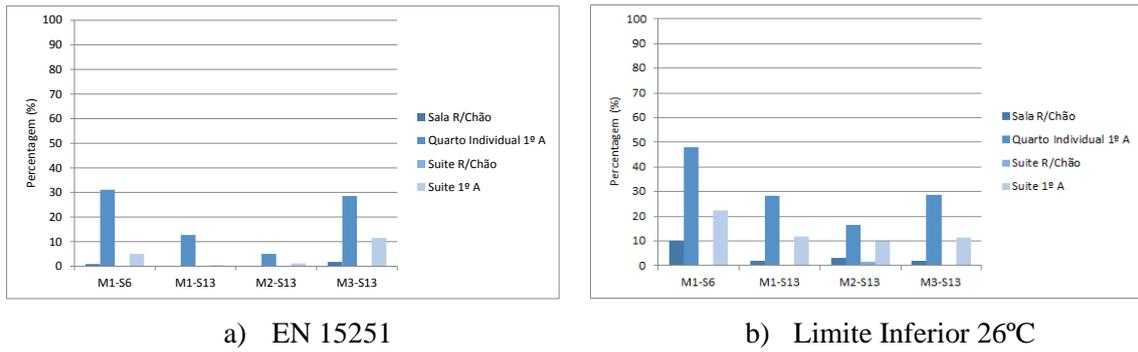


Figura 68 – Percentagem de desconforto para a estação de arrefecimento, entre a) EN 15251 [43] e b) limite superior de 26°C

Na Figura 69 é apresentada a percentagem de desconforto em formato de graus hora para a estação de arrefecimento. Conclui-se que o desconforto durante a estação de arrefecimento é praticamente desprezável quando comparado com a estação de aquecimento. O modelo M1-S13 apresenta um resultado muito semelhante ao modelo M3-S13. O modelo M2-S13 é o que apresenta percentagens de desconforto mais reduzidas, no entanto, como já foi referido, o valor da temperatura interior é demasiado reduzido na estação de arrefecimento. Como era de esperar os valores mais altos pertencem ao quarto individual no 1º Andar com um valor aproximado de 6000 GH.

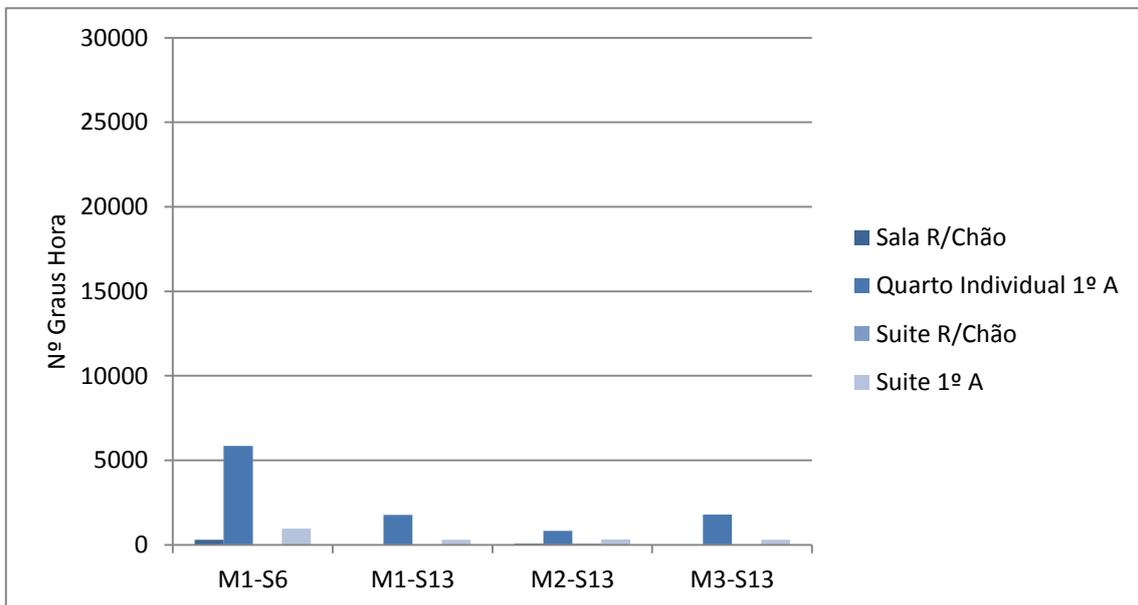


Figura 69 - Percentagem de desconforto para a estação de arrefecimento medida em graus hora, entre os modelos M1-S6, M1-S13, M2-S13 e M3-S13

6.3.3 – Necessidades Energéticas

Optou-se por apresentar os valores das necessidades energéticas no mesmo gráfico e não separadamente, dado que o objectivo é seleccionar dentro dos modelos estudados o

que apresenta melhores resultados para ambas as estações. O M1-S6 é o único que não cumpre o limite máximo de energia primária (120 kWh/m².a), não podendo por isso ser considerado uma *Passive House*. Os modelos M1-S13 e M1-S21 não respeitam também os requisitos energéticos *Passive House* devido à excedência do valor de necessidades de aquecimento (15 kWh/m².a). Dos restantes modelos M2-S13 e M3-S13 apesar de necessidades energéticas idênticas, considera-se que o modelo M3-S13 seria ideal para a região de Aveiro. Isto porque apresenta um valor quase nulo de necessidades de arrefecimento e é dispensável a abertura constante dos envidraçados durante o período nocturno,

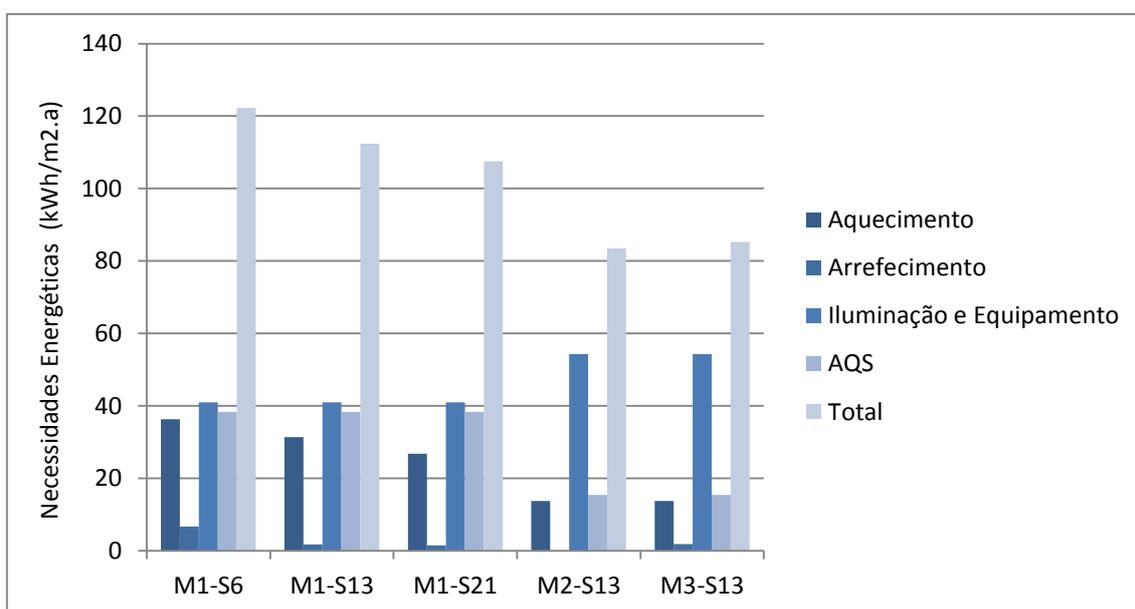


Figura 70 – Necessidades energéticas do modelo original e dos otimizados

6.4 - Estudos Complementares

6.4.1 - Influência do Comportamental dos Ocupantes na Operacionalidade das Protecções Solares

Como já foi explicado, na definição dos horários de funcionamento manual dos sistemas de protecção solar partiu-se do pressuposto que durante a estação de arrefecimento os ocupantes do edifício não teriam o cuidado de fechar as persianas exteriores de forma a evitar ganhos solares excessivos. Pretende-se deste modo compreender, se com o comportamento contrário, se conseguiria reduzir o risco de sobreaquecimento para um limite razoável.

Optou-se por escolher o modelo original com o menor nível de espessuras de isolamento na análise das duas semanas mais quentes de Agosto M1-S6 e M1-S7. Serão

então comparadas três hipóteses: (i) Em que não existe o cuidado de fechar as persianas durante o dia; (ii) Em que efectivamente existe esse cuidado; (iii) Com o sistema automático. O estudo será feito apenas para uma zona térmica com elevado risco de sobreaquecimento, optando-se por isso, pelo quarto individual no 1º Andar.

Na Tabela 20 são apresentados os horários de accionamento para cada hipótese atrás referida.

Tabela 20 - Horários de Funcionamento dos Sistemas de Fecho das Persianas Exteriores

Sistema Manual – Fecho Descuidado (Hipótese 1)		
Inverno	Verão	
100% - Fechado	100% - Fechado	
18:00 às 8:00	00:00 às 8:00	
Sistema Manual – Fecho Cuidado (Hipótese 2)		
Inverno	Verão	
100% - Fechado	70% - Fechado	30% - Fechado
18:00 às 8:00	00:00 às 17:00	00:00 às 8:00
Sistema Automático (Hipótese 3)		
Inverno	Verão	
100% - Activado	70% - Fechado	100% - Fechado
18:00 às 8:00	08:00 às 00:00 (*)	00:00 às 8:00

(*) No sistema automático, todas as zonas térmicas contêm um sensor de temperatura em que 70% da altura da janela é preenchida pela protecção solar sempre que a temperatura máxima atinge os 23°C.

A única diferença do fecho descuidado para o fecho cuidado é que os ocupantes durante a estação de arrefecimento apenas subiriam a persiana exterior 30% da altura da janela durante o período diurno. Evitando-se desta forma ganhos solares excessivos e garantindo sempre a luminosidade dos espaços. Na Figura 71 são apresentados os resultados das três hipóteses acima explicadas para as duas semanas mais quentes de Agosto.

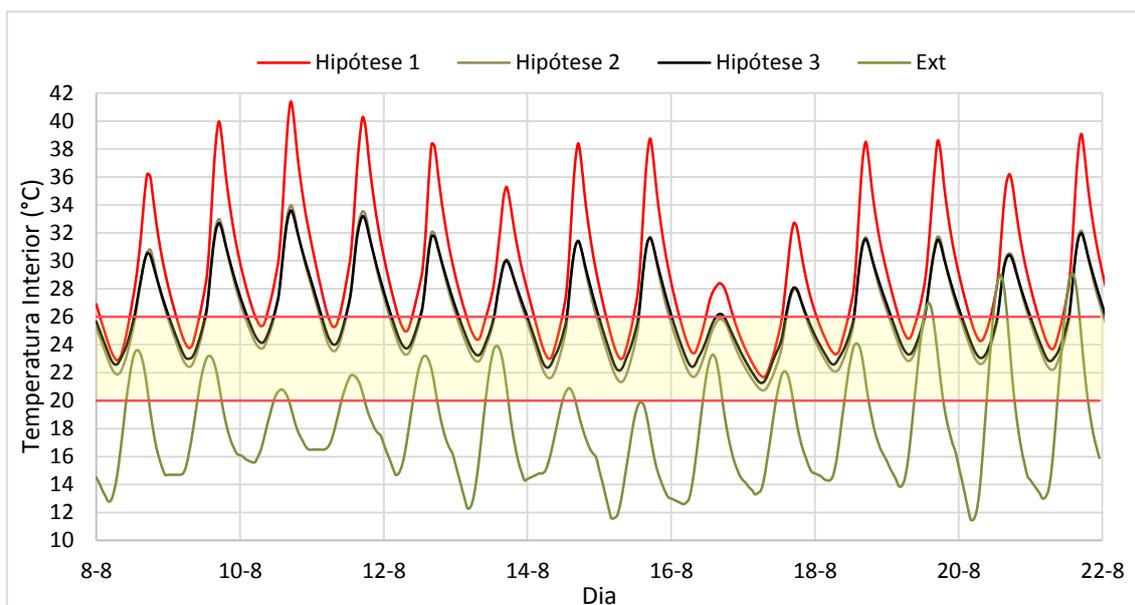


Figura 71 – Influência da utilização de sistemas de protecção solar manual e automática

Através da Figura 71, conclui-se que é possível reduzir significativamente as temperaturas com o sistema de protecção solar escolhido. A hipótese 1 demonstra que deixar as persianas abertas durante todo período diurno não é solução quando se pretende reduzir a taxa de sobreaquecimento do espaço. A hipótese 2 e 3 têm um comportamento muito semelhante com reduções enormes da temperatura interior, com um máximo de 7°C no dia 11 de Agosto.

Na Tabela 21 são apresentados os valores da taxa de sobreaquecimento global do edifício para cada hipótese estudada.

Tabela 21 - Valores da taxa de sobreaquecimento do edifício para cada hipótese de activação da protecção solar

Taxa de Sobreaquecimento [%]		
Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 3
15,32	6,37	7,98

Pela análise da Figura 71 e da Tabela 21, conclui-se que se os ocupantes do edifício tiverem o cuidado de fechar as persianas durante o período de diurno da estação de arrefecimento, é dispensável a utilização de um sistema automático.

Para concluir pretende-se demonstrar, que é possível otimizar ainda mais o sistema automático ao reduzir a temperatura de fecho das protecções solares. Como já foi explicado as persianas exteriores baixam até 70% da altura da janela sempre que a

temperatura interior atinge a temperatura de 23°C. Na Tabela 22 é apresentado o valor da taxa de sobreaquecimento do edifício reduzindo esse valor até ao limite inferior de conforto ($T=20^{\circ}\text{C}$).

Tabela 22 - Influência da redução da temperatura de fecho do sistema automático de protecção solar

Taxa de Sobreaquecimento [%]			
23°C	22°C	21°C	20°C
7,98	7,13	6,71	6,48

Conclui-se através da análise da Tabela 21, que a redução da temperatura de fecho do sistema automático de protecção solar ainda tem uma influência considerável no sobreaquecimento, com uma redução máxima de 1,5%.

6.4.2 - Influência do Aumento da Inércia Térmica das Soluções Construtivas no Comportamento Térmico do Edifício

No capítulo 4 da presente dissertação foi determinada a classe de inércia térmica do edifício original, tendo sido classificada como média. Foi também determinado o valor da massa superficial de cada solução construtiva e concluiu-se que a sua maior percentagem está concentrada no piso térreo (zona maciça). Como tal, durante os estudos de optimização para colmatar a falta de massa superficial de algumas soluções construtivas foi adicionada uma camada de reboco de 2cm pelo interior de todas as paredes exteriores e em todas as paredes interiores.

Esta solução de optimização apenas foi criada para comprovar que com o aumento de inércia térmica é possível melhorar o comportamento do edifício durante a estação de arrefecimento. Nos modelos avaliados (ver Figura 45), não foi seleccionado nenhum modelo com aumento de inercia térmica dado que não se considera a colocação de uma camada de reboco sobre placas de gesso cartonado uma solução exequível.

Estes modelos foram criados para otimizar o tempo de duração das simulações dado que a utilização de *phase change material* PCM's, solução inovadora para aumentar a inércia térmica de soluções construtivas, implicaria a alteração do algoritmo de cálculo aumentando em muito o tempo de cada simulação. Optou-se também por escolher o modelo original para a menor combinação de espessuras de isolamento para as duas semanas mais quentes de Agosto. Os modelos escolhidos foram M1-S6 e M1-S2. Serão

avaliadas duas hipóteses: (i) Com a solução original de projecto; (ii) Com o aumento da inércia térmica de todas as paredes do edifício com a aplicação do reboco de 2cm.

Na Figura 72 são apresentados os resultados das duas hipóteses estudadas

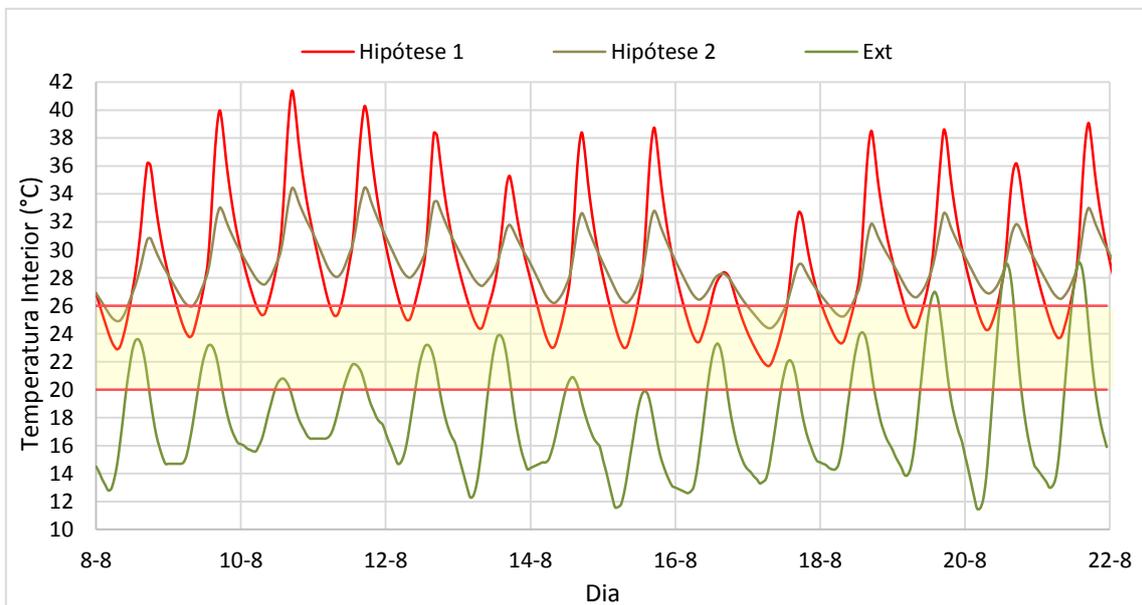


Figura 72 – Influência do aumento da inércia térmica na temperatura interior do quarto individual do 1º Andar

Através da Figura 72, conclui-se que com o aumento da inércia térmica, os picos de temperatura reduziram significativamente. O pico máximo no dia 11 de Agosto desceu de 41°C para aproximadamente 35°C. A amplitude máxima de temperatura desceu de 16°C para 9°C. Os valores mínimos de temperatura também aumentaram cerca de 2 a 3°C.

Na Tabela 23 é apresentado a diferença na taxa de sobreaquecimento do edifício comparando as duas hipóteses estudadas.

Tabela 23 - Influência do aumento da inércia térmica na taxa de sobreaquecimento

Taxa de Sobreaquecimento [%]	
Hipótese 1	Hipótese 2
15,23	12,94

Verifica-se uma descida no valor do sobreaquecimento de aproximadamente 2,3%.

6.5 - Estudo do Desempenho Térmico para Diferentes Regiões

6.5.1 - Escolha das Regiões Representativas do Clima de Portugal

Depois de otimizado o edifício original para uma *Passive House* na região de Aveiro, pretende-se verificar o comportamento dos modelos estudados para outras regiões do país e compreender se é possível com estes alcançar *Passive Houses*. Foram escolhidas mais três regiões para além de Aveiro, duas interiores e uma na faixa litoral, (ver Figura 73). Das duas regiões do interior escolhidas pretende-se que Bragança represente a zona norte do país e Évora a zona sul. A outra região escolhida foi Faro para representar o litoral sul do país.



Figura 73 – Representação das regiões escolhidas no mapa de Portugal

Na Figura 74, são apresentados os valores das temperaturas exteriores das quatro regiões seleccionadas para um período anual. Os dados climáticos relativos a Bragança, Évora e Faro, foram retirados da base de dados do programa [45] e foram obtidos através do *ASHRAE - International Weather for Energy Calculations IWEC* e do INETI. Contrariamente ao ficheiro climático da região de Aveiro, os restantes incluem os dados completos de velocidade e rumo do vento, sendo possível desta forma testar os modelos onde é feita ventilação nocturna através da abertura de janelas.

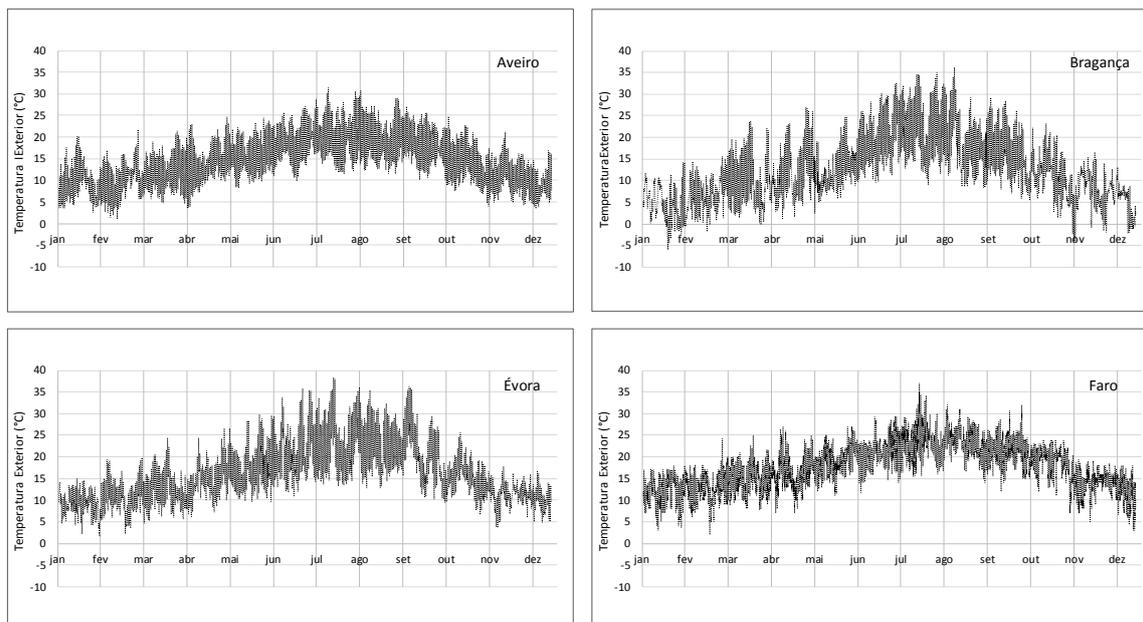


Figura 74 – Variação da temperatura exterior para as regiões de Aveiro, Bragança, Évora e Faro
 Na Tabela 24, são apresentados os valores máximos, mínimos e médios das curvas de temperatura exterior de cada região da Figura 74.

Tabela 24 - Resumo das curvas de temperatura das quatro regiões escolhidas

Text. [°C]	Aveiro	Bragança	Évora	Faro
Máximo	31,40	36,20	38,40	37,00
Mínimo	1,00	-6,00	1,60	2,00
Média	14,03	12,40	15,81	17,77

Através da Figura 74 e da Tabela 23, conclui-se que Bragança é a região que apresenta a média de temperaturas mais baixa, com um mínimo absoluto de -6°C . A região de Faro apresenta uma curva de temperatura semelhante à de Aveiro, no entanto, a média de temperaturas é consideravelmente superior, com um valor máximo absoluto de 37°C . Évora é a região que atinge temperaturas mais elevadas, com um máximo absoluto de 38.4°C .

Devido às temperaturas de algumas das regiões escolhidas foi seleccionado mais um modelo para além dos que foram estudados para Aveiro. O modelo M3-S23 corresponde à utilização do sistema de ventilação com recuperação de calor no período de Inverno e realização de *bypass* no período de Verão, para a combinação máxima de espessuras de isolamento e utilização de vidro triplo.

6.5.2 - Necessidades Energéticas

Da mesma forma que foram estimadas as necessidades energéticas associadas ao funcionamento dos equipamentos, iluminação e água quente sanitária para a região de Aveiro, foi feito o mesmo procedimento para Bragança, Évora e Faro. Os valores relativos à iluminação e equipamentos são iguais. Quanto à água quente sanitária o valor será diferente de região para região devido às diferentes contribuições dos painéis solares associados aos climas de estudo. Assim, recorrendo mais uma vez ao programa PHPP [36], na Tabela 25 são apresentados os valores das necessidades energéticas para cada região climática.

Tabela 25 - Estimativa das necessidades energéticas associadas aos equipamentos, iluminação e AQS para Bragança, Évora e Faro

Necessidades Energéticas [kWh/m ² .a]	Bragança		Évora		Faro	
	Edifício Original	Edifício <i>Passive House</i>	Edifício Original	Edifício <i>Passive House</i>	Edifício Original	Edifício <i>Passive House</i>
Equipamentos e Iluminação	41,00	54,30	41,00	54,30	41,00	54,30
Água Quente Sanitária	30,86	14,46	38,40	16,23	43,22	15,47

6.5.2.1 - Aveiro

Pela análise da Figura 75, conclui-se que o modelo M1-S6 é o que apresenta maiores resultados de necessidades de aquecimento e arrefecimento e ainda o valor mais elevado de energia primária, não cumprindo desta forma, os requisitos energéticos da *Passive House*. Os modelos M1-S13 e M1-S21 não cumprem também os requisitos energéticos devido ao valor limite de necessidades de aquecimento. Os modelos M2-S13, M3-S13 e M3-S23 são considerados *Passive Houses*. Considera-se no entanto, que a opção pelo modelo M3-S23 não se justificaria para a região de Aveiro, dado que apenas diminuiria o valor das necessidades de aquecimento, necessitando para isso da utilização dos níveis máximos de isolamento e vidro triplo (não compatíveis com a realidade construtiva nesta região).

Conclui-se desta forma que para a região de Aveiro, tendo em conta as necessidades energéticas, os modelo M2-S13 e M3-S13 são os mais adequados para ambas as estações.

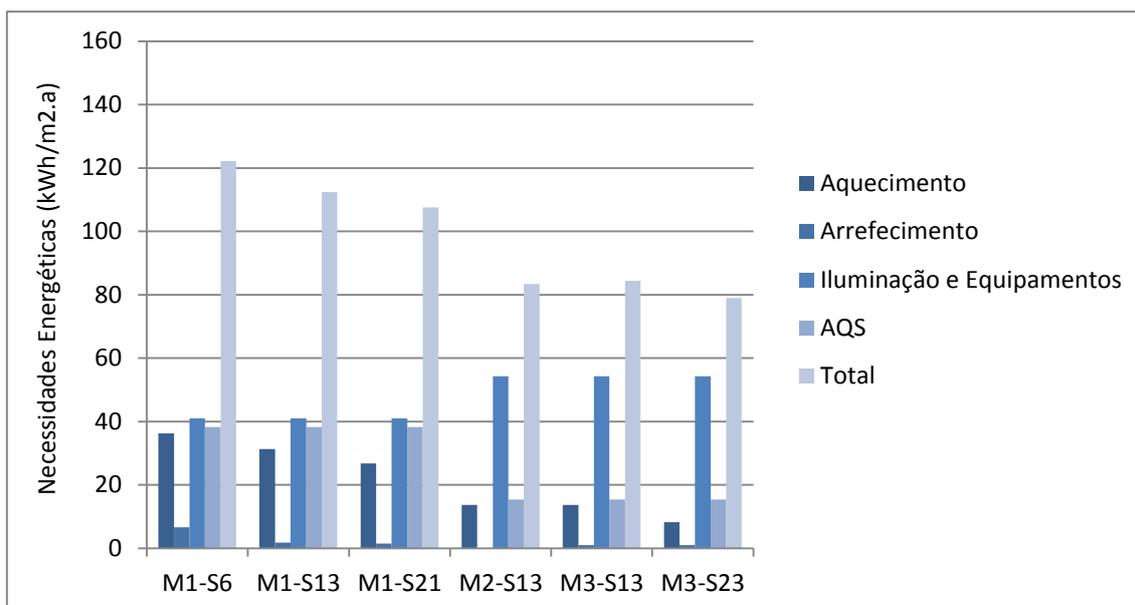


Figura 75 – Necessidades energéticas para a região de Aveiro

6.5.2.2 - Bragança

Da Figura 76, conclui-se que os modelos M1 são os que apresentam valores superiores de energia primária, não cumprindo os requisitos energéticos *Passive House*. Devido à região de Bragança ter temperaturas exteriores muito baixas, os modelos M1-S21, M2-S13 e M3-S13 não cumprem o limite máximo das necessidades de aquecimento. O único modelo que se aproxima dos requisitos *Passive House*, mas que não os cumpre (por uma diferença de $0.61 \text{ kWh/m}^2.\text{a}$ é o modelo M3-S23, com a espessura máxima de isolamento e utilização de vidro triplo.

Para a região de Bragança o modelo M3-S23 é então considerado o mais adequado para ambas as estações, no entanto, seria necessário optar pelo aumento dos níveis de isolamento, utilização de envidraçados com um factor solar superior ou diminuir a taxa de renovação do sistema de ventilação com recuperação de calor. Desta forma passaria a cumprir o limite máximo para as necessidades de aquecimento $15 \text{ kWh/m}^2.\text{a}$.

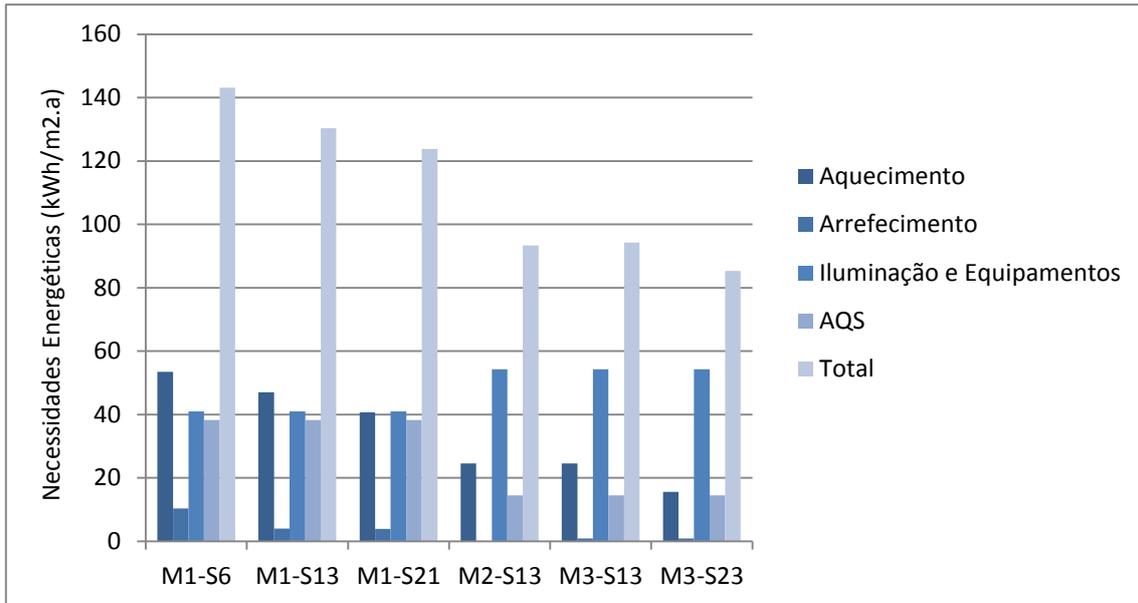


Figura 76 – Necessidades energéticas para a região de Bragança

6.5.2.3 - Évora

Através da Figura 77, conclui-se que o modelo M1-S6 é o único que não cumpre o valor máximo de energia primária definida pela *Passive House*. Os modelos M1-S13 e M1-S21 não cumprem os requisitos energéticos devido ao excessivo valor das necessidades de aquecimento que apresentam. Os restantes modelos M2-S13, M3-S13 e M3-S23 são considerados *Passive Houses*.

Para a região de Évora consideram-se aceitáveis qualquer um dos modelos M2-S13 e M3-S13 para ambas as estações.

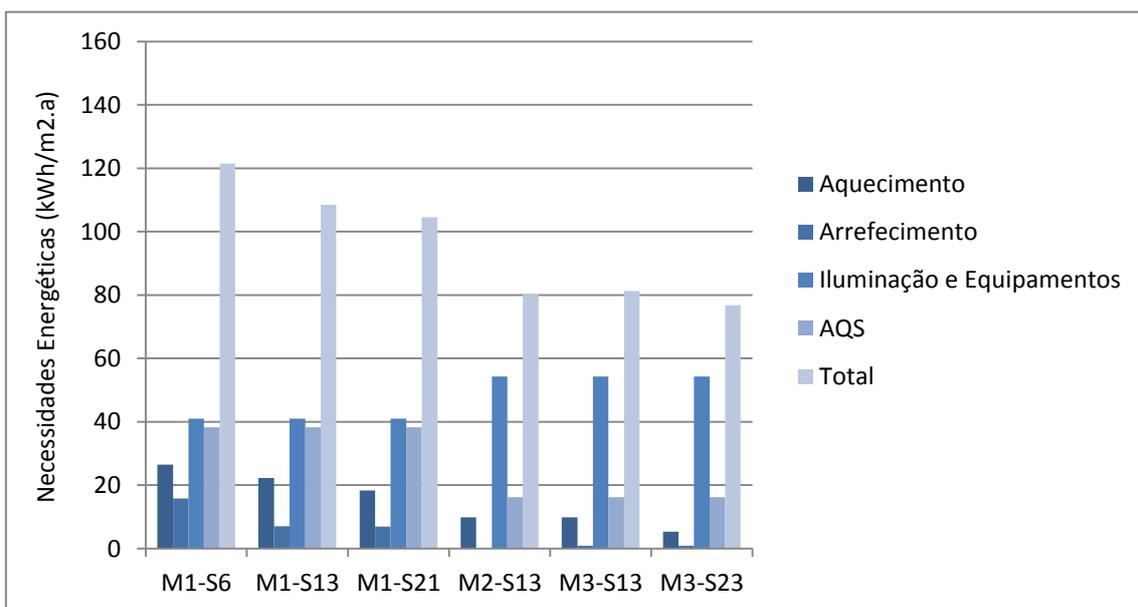


Figura 77 – Necessidades energéticas para a região de Évora

6.5.2.4 - Faro

Através da Figura 78, conclui-se que todos os modelos respeitam o critério do limite máximo de energia primária da *Passive House*. Como Faro é a região com a média de temperaturas mais elevada, o que se verifica no modelo M1-S6 é que o valor das necessidades de arrefecimento é consideravelmente superior ao valor das necessidades de aquecimento. Verifica-se também que ao aumentar o nível de espessuras intermédias de isolamento do modelo M1-S13 para a combinação máxima de espessuras de isolamento do modelo M1-S21, as necessidades de arrefecimento aumentam ligeiramente. Conclui-se que para esta região com um Inverno pouco rigoroso não é benéfica a utilização de grandes espessuras de isolamento, dado que a dissipação de calor torna-se mais difícil durante o Verão para edifícios de inércia leve. Os modelos M1-S13, M1-S21, M2-S13, M3-S13 e M3-S23 cumprem os requisitos energéticos da *Passive House*.

Para a região de Faro em relação às necessidades energéticas consideram-se adequados qualquer um dos modelos M2-S13 e M3-S13 para ambas as estações.

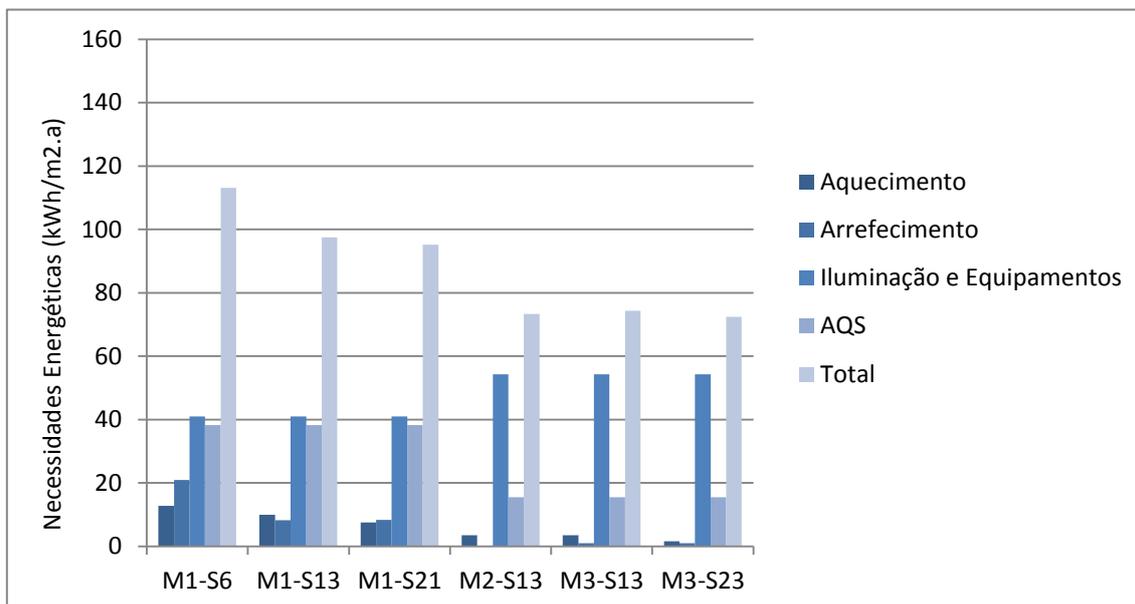


Figura 78 – Necessidades energéticas para a região de Faro

6.5.3 - Avaliação do Desconforto

No presente subcapítulo será avaliado o desconforto durante a estação de aquecimento e arrefecimento com base na contabilização do número de horas que a temperatura interior de cada zona térmica representativa do edifício excede os limites de conforto ($20^{\circ}\text{C} < T < 26^{\circ}\text{C}$). Na análise dos modelos M2-S13, M3-S13 e M3-S23, não são

apresentados os resultados para a estação de aquecimento dado que é utilizado um sistema de ventilação com recuperação de calor com um limite mínimo de conforto de 20°C. Para estes modelos, são nulas as percentagens de desconforto.

6.5.3.1 - Aveiro

Através da análise da Figura 79, verifica-se que existe uma maior percentagem de desconforto durante a estação de aquecimento comparativamente à estação de arrefecimento. A suite no R/Chão e a suite do 1ºAndar são as zonas térmicas que apresentam uma maior percentagem de desconforto durante a estação de aquecimento. Verifica-se também que o aumento das espessuras de isolamento não traduz uma redução significativa nos níveis de desconforto.

Para a estação de arrefecimento, o quarto individual do 1º Andar e a suite do 1ºAndar, são as zonas térmicas que apresentam maior percentagem de desconforto. O Modelo M2-S13 é o que apresenta menor percentagem de sobreaquecimento, chegando a valores demasiado baixo como já foi demonstrado no estudo individual desse modelo. Do modelo M3-13 para o modelo M3-S23, não existe uma redução considerável das percentagens de desconforto.

Conclui-se que para a região de Aveiro, o modelo M3-S13 é o mais adequado para ambas as estações, no que diz respeito ao conforto.

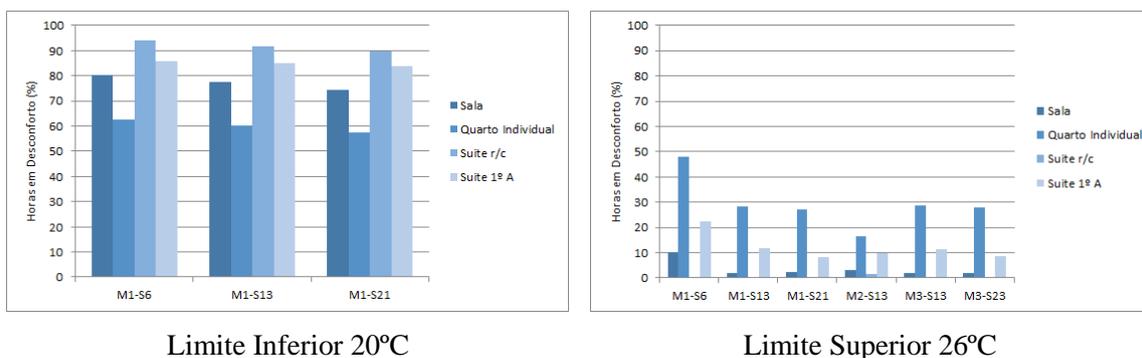


Figura 79 – Análise de desconforto para os limites 20 e 26°C para a região de Aveiro

6.5.3.2 - Bragança

Através da Figura 80, verifica-se que em relação à região de Aveiro o desconforto durante a estação de aquecimento e arrefecimento é superior. A sala e a suite do R/Chão continuam a ser as zonas térmicas com maiores percentagens de desconforto durante o Inverno para todos os modelos estudados.

Durante a estação de arrefecimento, o quarto individual no 1º Andar e a suite do 1º Andar continuam também a ser as zonas térmicas com maior percentagem de desconforto. Os modelos M1-S13, M1-S21, M3-S13 e M3-S21 apresentam um comportamento muito análogo.

Conclui-se que para a região de Bragança, o modelo M2-S13, apresenta a melhor solução no que diz respeito ao conforto.

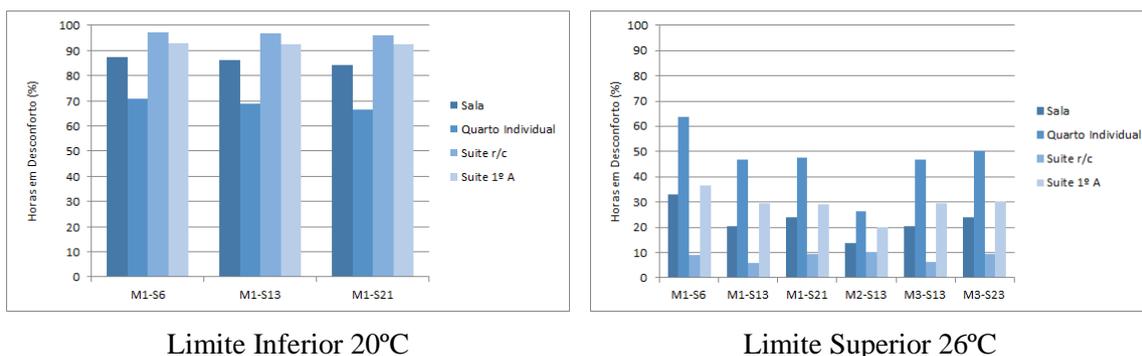


Figura 80 – Análise de desconforto para os limites 20 e 26°C para a região de Bragança

6.5.3.3 - Évora

Através da Figura 81, verifica-se que comparativamente a Aveiro, as percentagens de desconforto reduziram consideravelmente durante a estação de aquecimento e subiram para a estação de arrefecimento. O comportamento individual das zonas térmicas é comum às outras regiões para as duas estações.

Na estação de arrefecimento o recurso à ventilação nocturna através da abertura de janelas torna-se bastante eficaz devido às temperaturas médias exteriores serem consideravelmente superiores às de Aveiro.

Conclui-se que para a região de Évora o modelo M2-S13 é o que apresenta um melhor comportamento para ambas as estações.

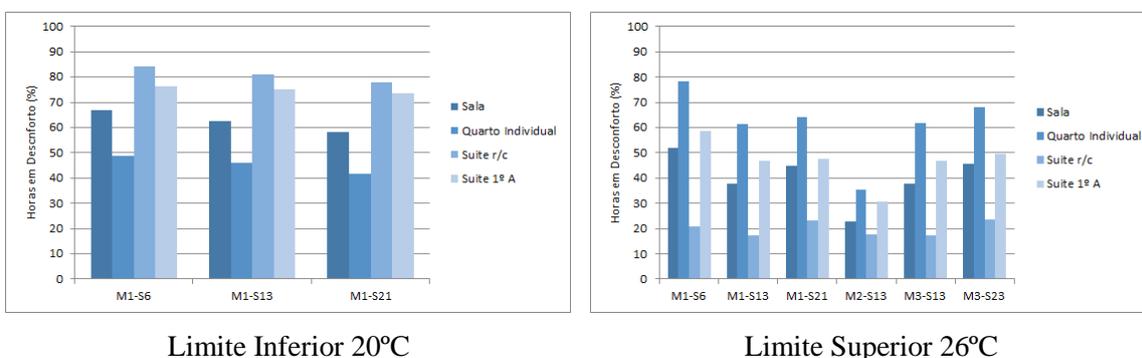


Figura 81 – Análise de desconforto para os limites 20 e 26°C para a região de Évora

6.5.3.4 - Faro

Através da análise da Figura 82, verifica-se que Faro é a região com menores percentagens de desconforto durante a estação de aquecimento e maiores percentagens de desconforto durante a estação de arrefecimento. Mais uma vez o comportamento individual das zonas térmicas é comum às restantes regiões variando apenas o valor das percentagens de desconforto.

Como Faro é a região com a média de temperatura exterior mais elevada, possivelmente justificar-se-ia neste caso a simulação dos modelos do tipo M4 em que seria feito cumulativamente *bypass* e ventilação nocturna minimizando muito o risco de sobreaquecimento.

Conclui-se que para a região de Faro o modelo M2-S13 é o que apresenta um melhor comportamento para ambas as estações.

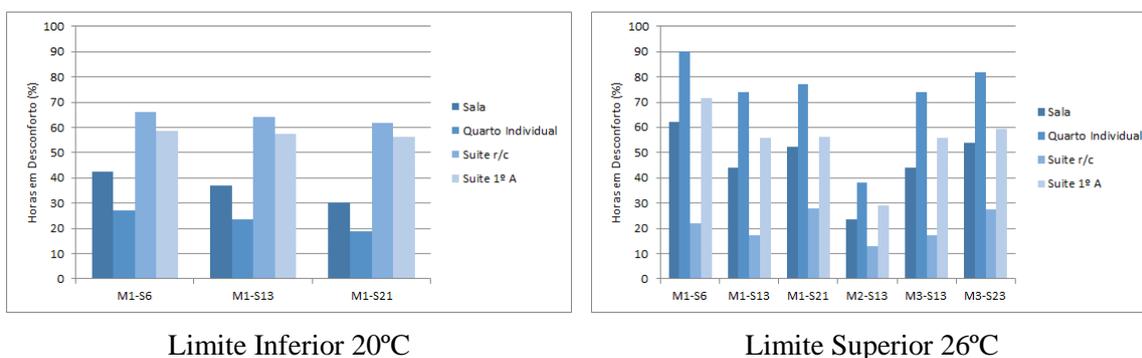


Figura 82 – Análise de desconforto para os limites 20 e 26°C para a região de Faro

6.6 - Síntese Geral

Na Figura 83, são apresentados os modelos que conduzem aos melhores resultados para cada região climática de Portugal. Na sua escolha foram seleccionados os modelos mais adequados tendo em conta as necessidades energéticas e o nível de conforto para cada região estudada. A prioridade de selecção teve por base o cumprimento dos requisitos definidos pela norma *Passive House* em termos energéticos e de conforto. Para a região de Aveiro, Évora e Faro os níveis intermédios de espessuras de isolamento foram suficientes. Para Bragança seria necessário aumentar ligeiramente os níveis de isolamento, melhorar o factor solar dos envidraçados ou reduzir a taxa de renovação de ar durante a estação de aquecimento. Quanto à ventilação, para a região de Aveiro e Bragança o modo *bypass* do aparelho activo de ventilação é suficiente para obter níveis

razoáveis de conforto durante a estação de arrefecimento. Para a região de Évora e Faro é necessário recorrer à ventilação nocturna através da abertura de janelas.

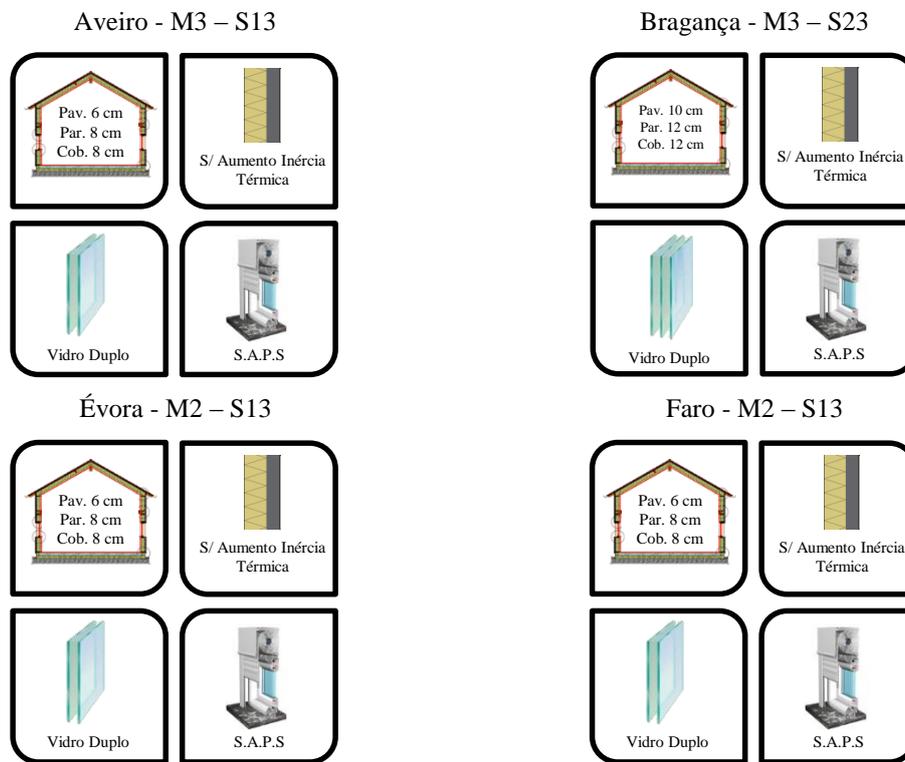


Figura 83 – Os melhores modelos para as diferentes regiões de Portugal

Na Figura 84 é apresentada a variabilidade das temperaturas interiores durante a estação de arrefecimento para os 4 modelos identificados. Aveiro é a região que apresenta um comportamento térmico interior mais equilibrado com menores amplitudes térmicas. Évora é a região que apresenta amplitudes térmicas mais elevadas comparativamente às restantes regiões.

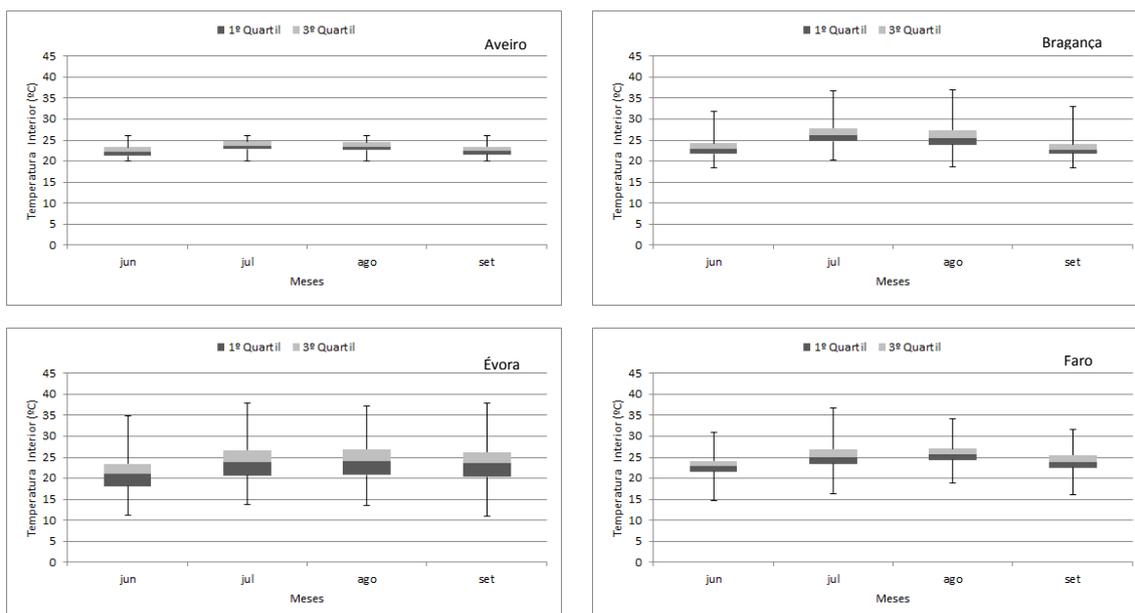


Figura 84 – Distribuição da temperatura interior durante a estação de arrefecimento

Não será apresentada a distribuição da temperatura interior durante a estação de aquecimento, dado que, para todas as regiões foi utilizado um sistema de ventilação com recuperação de calor, não existindo desta forma desconforto

Capítulo 7

Considerações Finais

Capítulo 7 Considerações Finais

7.1 - Síntese do Trabalho Realizado

7.2 - *Passive House* em Portugal

7.3 - Simulação Dinâmica

7.4 - Geometria e Tipologia Construtiva do Modelo

7.5 - Estudos Paramétricos

7.5.1 - Edifício Referência – Sistema de Construção Original

7.5.2 - Estudo Paramétricos para a região de Aveiro

7.5.3 - Outras Regiões – Capitais de Distrito

7.6 - Desenvolvimento de Estudos Futuros

Capítulo 7 - Considerações Finais

7.1 - Síntese do Trabalho Realizado

O estudo desenvolvido pretende contribuir para a implementação do conceito PH em Portugal, através de um estudo detalhado para a região de Aveiro.

Foi também estudado de forma simplificada a aplicabilidade deste conceito a outras zonas do país. Foram escolhidos alguns dos cenários resultantes do estudo de sensibilidade para 4 regiões geográficas representativas do território nacional e posteriormente avaliado o conforto desses cenários e as respectivas necessidades energéticas.

7.2 - *Passive House* em Portugal

Conclui-se com o presente trabalho que o conceito *Passive House* é suscetível de ser aplicado aos países do Sul da Europa, nomeadamente a Portugal. No entanto, é fundamental adaptar as técnicas e soluções construtivas a cada região, dado que este conceito nasceu na Alemanha (país com características climáticas bastante distintas). São também necessários cuidados adicionais relativamente ao risco de sobreaquecimento dos espaços durante a estação de arrefecimento. Por outro lado, existe a vantagem de tirar partido da faixa litoral Portuguesa, propícia à realização eficaz de ventilação natural nocturna.

7.3 - Simulação Dinâmica

Os programas de simulação dinâmica de edifícios são extremamente interessantes pela sua capacidade em simular em simultâneo uma série de aspectos: cargas térmicas, elementos de produção de energia térmica e sistemas de ventilação e ar novo. O que permitiu o desenvolvimento das variáveis dos estudos paramétricos e avaliá-las em simultâneo.

7.4 - Geometria e Tipologia Construtiva do Modelo

A presente dissertação teve por base o estudo de um edifício pré-fabricado *light steel frame* (LSF). Esta constitui mais uma prova que o conceito *Passive House* não é limitado a uma determinada tipologia construtiva específica. A orientação do edifício, apesar de não ter sido alvo de estudo, bem com a disposição e área dos envidraçados, foi

muito importante para o cumprimento dos requisitos PH (nomeadamente para o cumprimento do valor das necessidades de aquecimento).

A significativa quantidade de área envidraçada orientada a Sudoeste, por outro lado, constituiu um elevado problema para os compartimentos de menor volume (quartos individuais do 1º Andar), comprometendo muitas vezes o conforto desses espaços, especialmente na estação de arrefecimento.

Outro aspecto relacionado com o edifício de estudo e não menos importante, é a massa superficial das soluções construtivas. Tornou-se muito complicado controlar e atenuar a amplitude térmica entre o período nocturno e diurno devido ao reduzido valor da massa superficial das soluções construtivas.

7.5 - Estudos Paramétricos

7.5.1 - Edifício Referência – Sistema de Construção Original

Algumas conclusões relativamente à simulação dinâmica do edifício original:

Devido à elevada área envidraçada dos quartos orientados a Sudoeste, é necessário recorrer a técnicas de ventilação e sistemas de protecção solar para reduzir o risco de sobreaquecimento e ainda reduzir as amplitudes térmicas desses espaços.

Depara-se que as estações do ano poderiam ter sido definidas de outra forma. Como ainda existem dias nos meses de Maio e Outubro com temperaturas médias diárias elevadas, a estação de arrefecimento em termos de simulação, poderia ter sido estendida de forma a começar na segunda semana de Maio e a terminar na segunda semana de Outubro. Desta forma não se obteriam temperaturas tão elevadas durante essas semanas naturalmente aceites como pertencentes à estação de aquecimento.

Relativamente ao comportamento das zonas térmicas constituintes do edifício, a suite do R/Chão e os quartos individuais do 1º Andar devido à sua volumetria, orientação e área envidraçada são os compartimentos mais críticos (os valores máximos e mínimos de temperaturas e maiores amplitudes térmicas).

7.5.2 - Estudo Paramétricos para a região de Aveiro

Estação de Aquecimento

Para obter a melhor combinação para o modelo para a região de Aveiro durante a estação de aquecimento, verificou-se que mesmo com o aumento para os níveis máximos de espessura de isolamento estudados é impossível cumprir os requisitos de

necessidades de aquecimento sem recorrer à utilização de um sistema de ventilação com recuperação de calor.

Verificou-se também que ao aumentar a espessura de isolamento das soluções construtivas dos níveis intermédios para os máximos não se verificou um aumento significativo das temperaturas interiores, no caso de não existir um sistema de ventilação com recuperação de calor.

Relativamente ao estudo do conforto térmico dos compartimentos representativos do edifício durante a estação de aquecimento, conclui-se que apresentam percentagens de desconforto elevadíssimas no caso de não existir um sistema de ventilação com recuperação de calor. Conclui-se também que devido à categoria em que o edifício se insere a norma EN15251 [43] é significativamente mais exigente que o limite de conforto inferior (20°C).

Estação de Arrefecimento

A melhor solução para a região de Aveiro durante a estação de arrefecimento, verificou-se que o sistema automático de protecção solar foi muito eficaz na redução do sobreaquecimento, nomeadamente nos quartos individuais do 1º Andar. Conclui-se também que estes sistemas seriam dispensáveis para alguns dos compartimentos do edifício como a sala e a suite do R/Chão.

Conclui-se também que a ventilação nocturna através da abertura de janelas arrefece em demasia alguns dos compartimentos do edifício (s valor da temperatura interior baixa do limite de conforto estabelecido pela EN15251 [43]), tendo apenas como principal vantagem um valor nulo para as necessidades de arrefecimento.

O modo *bypass* do sistema de ventilação é considerado a solução mais interessante, devido ao reduzido consumo de energia associado.

Relativamente ao estudo do conforto térmico dos compartimentos representativos do edifício durante a estação de arrefecimento, apresentam níveis de desconforto muito inferiores comparativamente à estação de aquecimento. Conclui-se também que a norma EN 15251 [43] não é tão exigente como o limite superior de conforto definido (26°C).

Estudos Complementares

Relativamente ao estudo da influência comportamental dos ocupantes na operacionalidade das protecções solares, conclui-se que se os utilizadores tiverem o cuidado de fechar as persianas exteriores de forma inteligente (evitar ganhos solares excessivos durante a estação de arrefecimento e tirar partido dos ganhos solares na estação de aquecimento), os sistemas automáticos são dispensáveis.

Relativamente à influência do aumento da inércia térmica, conclui-se que é condicionante para este tipo de construção leve com muita área envidraçada um valor considerável de massa superficial das soluções construtiva. Com isto, é possível reduzir significativamente o valor das amplitudes térmicas.

7.5.3 - Outras Regiões – Capitais de Distrito

No estudo da adaptação do conceito *Passive House* para outras regiões do país concluiu-se:

Para Bragança mesmo com os níveis máximos de espessuras de isolamentos estudados e com utilização de envidraçados de vidro triplo, não foi possível cumprir o valor limite das necessidades de aquecimento por apenas 0.61 (kWh/m².a). Bastaria aumentar ligeiramente as espessuras de isolamento, melhorar a qualidade dos envidraçados (factor solar g do vidro) ou até reduzir a taxa de renovação de ar. Bragança apresenta níveis de desconforto bastante superiores na estação de aquecimento comparativamente à estação de arrefecimento. O modelo com melhores níveis de conforto para esta região corresponde ao modelo que prevê ventilação nocturna através da abertura de janelas.

Para Évora dos seis modelos escolhidos, três cumpriram as necessidades energéticas da norma *Passive House*, para a combinação de espessuras intermédios e máximos. Évora apresenta níveis de desconforto significativamente superiores na estação de aquecimento comparativamente à estação de arrefecimento. O que apresenta melhores níveis de conforto para esta região corresponde ao modelo com ventilação nocturna através da abertura de janelas.

Para Faro não foi necessário recorrer aos níveis máximos de espessuras de isolamento (Inverno pouco rigoroso), em que seis dos modelos, três cumpriram os requisitos energéticos da norma PH. Faro apresenta níveis de desconforto bastante superiores na estação de arrefecimento comparativamente à estação de aquecimento. O modelo com

melhores níveis de conforto para esta região corresponde ao modelo com ventilação nocturna através da abertura de janelas.

Como se verificou na síntese do Capítulo 6, não se optou sempre pela escolha dos níveis máximos de conforto dado que o primeiro critério passa pelo cumprimento das necessidades energéticas.

7.6 - Desenvolvimento de Estudos Futuros

O contributo do estudo desenvolvido na presente dissertação poderá ser ampliado em futuros trabalhos de investigação na área da eficiência energética e conforto térmico de edifícios do tipo *Passive House*. Destacam-se algumas das ideias que se consideram importantes a desenvolver:

O estudo da dissertação não contabiliza fenómenos de humidade. Considera-se importante a alteração do algoritmo de cálculo de balanço superficial para um estudo mais aprofundado que tenha em consideração os fenómenos de transferência de vapor de água na avaliação do conforto térmico.

Estudo sobre a utilização de *phase change materials* PCM's, a sua influência e optimização em edifícios de inércia leve. Este estudo seria bastante interessante já que se provou que com a utilização de uma camada de reboco pelo interior dos compartimentos as amplitudes térmicas reduziram significativamente.

Na dissertação foram definidos um conjunto de variáveis para a realização dos estudos de sensibilidade. Deveriam ainda ser avaliadas outro tipo de soluções como: a orientação do edifício, taxa de renovação de ar nos espaços, quantidade de área envidraçada orientada a Sul, etc.

Realização de um estudo mais completo e aprofundado sobre a aplicabilidade do conceito *Passive House* em Portugal, aumentando o número de regiões estudadas e optimizar individualmente o modelo original para cada uma delas.

Avaliar o conforto térmico com base em outros documentos normativos como AHRAE 55 [41], EN 7730 [42] e ISSO/TS 14415 [44].

Realização de mais estudos complementares e particulares como por exemplo: a resposta de determinadas zonas térmicas quando ocupada por um elevado número de pessoas durante um longo período de tempo.

Referências Bibliográficas

Bibliografia

1. EU, E. U. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings. *Official Journal of the European Union L*, 2010, 153: 13.
2. I.P.M.A, *Serviços de Clima - Cenários para Portugal Continental no Século XXI*. Consultado em: 2013. Disponível from: <http://www.ipma.pt>.
3. Ford, B., Schiano-Phan R., Zhongcheng D., *The PassivHaus standard in european warm climates: design guidelines for comfortable low energy homes* 2007. Part 1 A review of comfortable low energy homes.
4. Schnieders, J., *Passive Houses in South West Europe*. 2nd, corrected edition. 2009.
5. Feist, W., *Passive House Research Project*. Institute Housing and Environment, Darmstadt, 1988.
6. Feist, W., *What is a Passive House*. PassiveHaus Institute, Darmstadt, 2007.
7. Feist, W., *Certification as "Quality Approved Passive House" Criteria for Residential-Use Passive Houses*. Passive Haus Institut, 2007.
8. Association, I.P.H. Passipedia, *International Passive House Association*. Consultado em: 2013. Disponível em: <http://www.passipedia.org>.
9. PassivHaus Zero-Energy P.P. SlideShare. Consultado em: 2013. Disponível em: <http://www.passivhauszero-energy.com/>
10. Schnieders, J. and A. Hermelink, *CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building*. Energy Policy, 2006. 34(2): p. 151-171.
11. Hacienda, C.d.E.Y., O.G.d. Industria, and E.y. Minas, *Guía del estándar PassivHaus - Edifícios de consumo energético casi nulo*. 2011.
12. Chiras, Daniel D. *The solar house: passive heating and cooling*. Chelsea Green Publishing, 2002.

13. Mlakar, J. and J. Štrancar, *Overheating in residential passive house: Solution strategies revealed and confirmed through data analysis and simulations*. Energy and Buildings, 2011. 43(6): p. 1443-1451.
14. Archibald, *Blower Door Testing- Air Sealing and Insulating*. Consultado em: 2014. Disponível em: <http://www.callarch.com/blowerdoortestingair>
15. Energie-Lehner, *Termography*. Consultado em : 2014. Disponível em: <http://www.energie-lehner.ch/service-thermographie.php>
16. Larbi, A.B., *Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings*. Energy and Buildings, 2005. 37(9): p. 945-951.
17. Mao, G. and G. Johannesson, *Dynamic calculation of thermal bridges*. Energy and Buildings, 1997. 26(3): p. 233-240.
18. Macdonald, I.A., *Quantifying the effects of uncertainty in building simulation*, 2002, University of Strathclyde.
19. Negrao, C.O., *Conflation of computational fluid dynamics and building thermal simulation*. 1995: University of Strathclyde Glasgow.
20. Google Earth Blog, *3D Models*. Consultado em :2014. Disponível em: http://www.gearthblog.com/category/3d_models/page/3
21. Hensen, J.L.M., *On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system*. 1991: Technische Universiteit Eindhoven.
22. Hong, T., S. Chou, and T. Bong, *Building simulation: an overview of developments and information sources*. Building and environment, 2000. 35(4): p. 347-361.
23. Crawley, D.B., et al., *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Building and Environment, 2008. 43(4): p. 661-673.
24. Energy, U.S.D.O. *Building Energy Software Tools Directory*. Consultado em : 2013. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm

25. Autodesk. *Sustainable Building Design Software*. Consultado em : 2013. Disponível em: <http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis/>
26. Crawley, D.B., et al., *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*. Energy and Buildings, 2001. 33(4): p. 319-331.
27. ENERGYPLUS, 2013. *EnergyPlus Engineering Reference*. Consultado em: 2014. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_documentation.cfm
28. ENERGYPLUS, 2013. *EnergyPlus Input/Output Reference*. Consultado em: 2014. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_documentation.cfm
29. Google Help. *Elevation Profile*. Consultado em: 2014. Disponível em: <https://support.google.com/earth/answer/181393?hl=pt-PT>
30. LNEG, *Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2002*. Consultado em: 2014. Disponível em: www.lneg.pt
31. ISO, BSEN. 6946: 2007 Building components and building elements—Thermal resistance and thermal transmittance—Calculation method. 1923.
32. *Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação (REH)* Diário da República, I Série - A, Decreto-Lei nº 118/2013, Agosto, Lisboa, 2013.
33. TechTarget. *Free Cooling*. Consultado em: 2014 Disponível em: <http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/free-cooling>
34. EmaUA-Torre: Tempo e Clima. *Clima de Aveiro*. Consultado em: 2014. Disponível em: <http://ematorre.web.ua.pt/>
35. Original. *Sustentabilidade da Construção*. Consultado em: 2014. Disponível em: <http://Original.pt/sistema-Original/inovacao/>

36. Feist, Wolfgang, et al. Passive house planning package 2007. *Specifications for Quality Approved Passive Houses, Technical Information PHI-2007/1 (E)*, Darmstadt, Passivhaus Institut (December 2007), 2007.
37. Team, E. Tips & tricks for using EnergyPlus: insider secrets to using EnergyPlus. *US DOE Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE)*, 2010.
38. Melo, A.P., Westphal F. S. & Matos, M., 2009. *Apostila do Curso Básico do Programa EnergyPlus*. Florianópolis, Brasil: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações Universidade Federal de Santa Catarina.
39. Dos Santos, Carlos A. Pina; Matias, Luis. ITE 50–Coeficientes de transmissão Térmica de elementos da envolvente dos Edifícios–Laboratório Nacional de Engenharia Civil. *Versão actualizada*, 2006.
40. The Engineering ToolBox. *Solids – Specific Heats*. Consultado em: 2014. Disponível em: http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html
41. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE 55, 2004
42. CEN – Comité Européen de Normalisation, EN 7730:2001 – *Ergonomics of the Thermal Environment –Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD indices and Local Thermal Comfort Criteria*, CEN, Brussels, Belgium 2001
43. CEN - Comité Européen de Normalisation, EN 15251:2007 – *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. CEN, Brussels, Belgium, 2007;
44. International Organization for Standardization, *Ergonomics of the Thermal Environment – Application of International Standards to People with Special Requeriments*, ISO/TS 14415, 2005;

45. Energy, U.S.D.O. *EnergyPlus Energy Simulation Software – Weather Data*. Consultado em : 2014 Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal

Anexos

Anexo A - Propriedades do Modelo Original Retiradas do Programa *EnergyPlus*

Anexo B - Fichas Técnicas

Anexo C - Resultados de Todos os Cenários Simulados para a Região de Aveiro

Anexo A - Propriedades do Modelo Original Retiradas do Programa *EnergyPlus*

Serão apresentadas algumas das propriedades retiradas directamente dos *outputs* do programa *Energyplus*. Fazem parte as propriedades geométricas e energéticas do modelo original (modelo a partir do qual foram realizadas todas as optimizações da dissertação).

Características de simulação

	Value
Program Version and Build	EnergyPlus- Windows-64 8.1.0.009, YMD=2014.08.08 09:45
RunPeriod	ANUAL
Weather File	Aveiro_INETI PRT NaturalWorks converts for INETI data (Concelho index 39) WMO==085360
Latitude [deg]	50.00
Longitude [deg]	-8.6
Elevation [m]	50.00
Time Zone	0.00
North Axis Angle [deg]	223.30
Rotation for Appendix G [deg]	0.00
Hours Simulated [hrs]	8760.00

Área do edifício

	Area [m ²]
Total Building Area	236.61
Net Conditioned Building Area	148.02
Unconditioned Building Area	88.59

Relação área opaca e área envidraçada

	Total	North (315 to 45 deg)	East (45 to 135 deg)	South (135 to 225 deg)	West (225 to 315 deg)
Gross Wall Area [m ²]	198.36	35.68	63.50	35.68	36.50
Above Ground Wall Area [m ²]	198.36	35.68	63.50	35.68	36.50
Window Opening Area [m ²]	32.50	11.54	0.00	20.96	0.00
Gross Window-Wall Ratio [%]	16.38	32.33	0.00	58.74	0.00
Above Ground Window Wall Ratio [%]	16.38	32.33	0.00	58.74	0.00

Características de cada zona térmica

Thermal Zone	Area [m ²]	Conditioned (Y/N)	Part of Total Floor Area (Y/N)	Volume [m ³]	Gross Wall Area [m ²]	Window Glass Area [m ²]	Lighting [m ²]
Zona Térmica 1	47.78	Yes	Yes	134.94	58.41	8.50	2.10
Zona Térmica 2	20.74	Yes	Yes	54.52	31.33	3.70	2.10
Zona Térmica 3	2.84	Yes	Yes	7.67	0.00	0.00	2.10
Zona Térmica 4	20.90	Yes	Yes	71.29	29.65	3.28	2.10
Zona Térmica 5	13.00	Yes	Yes	33.81	20.96	5.68	2.10
Zona Térmica 6	13.00	Yes	Yes	33.80	20.96	5.68	2.10
Zona Térmica 7	4.60	Yes	Yes	11.96	0.00	0.00	2.10
Zona Térmica 8	25.15	Yes	Yes	72.49	37.28	5.66	2.10
Zona Térmica 9	88.59	No	Yes	402.50	198.35	0.00	0.00
Total	236.61			822.96	396.71	32.50	1.32
Conditioned Total	148.02			420.47	198.36	32.50	2.10
Unconditioned Total	88.59			402.50	198.35	0.00	0.00
Not Part of Total	0.00			0.00	0.00	0.00	0.00

Energia total

	Total Energy [GJ]	Energy Per Total Building Area [MJ/m ²]	Energy Per Conditioned Building Area [MJ/m ²]
Total Site Energy	33.68	142.34	227.54
Net Site Energy	33.68	142.34	227.54
Total Source Energy	106.97	452.11	722.72
Net Source Energy	106.97	452.11	722.72

Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento

	Electricity [GJ]	District Cooling [GJ]	District Heating [GJ]
Heating	0.00	0.00	19.83
Cooling	0.00	4.05	0.00
Interior Lighting	9.80	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00
Fans	0.00	0.00	0.00
Pumps	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	9.80	4.05	19.83

Anexo B - Fichas Técnicas

De seguida são apresentadas as fichas técnicas do vidro duplo e triplo utilizado, bem como a ficha técnica do sistema de ventilação com recuperação de calor.

Ficha técnica da caixilharia

Benefícios técnicos do sistema

Ensaio

	ENSAIO	DIMENSÕES	CLASSE
PERMEABILIDADE ao ar (UNE EN 1026:2000)	CIDEMCO 18236	1.300x1.300 mm	4*
ESTANQUEIDADE à água (UNE EN 1027:2000)	CIDEMCO 18236	1.300x1.300 mm	E 1200*
RESISTÊNCIA ao vento (UNE EN 12211:2000)	CIDEMCO 18236	1.300x1.300 mm	C5*

* Classificações máximas com respeito à norma

Determinação do coeficiente de transmitância térmica

SISTEMA SL/DJ-70	$U_{t,w} = 1,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
ENSAIO	ROSENHEIM 402 28226/1

JANELA SL/DJ 70 mm	UNE-EN ISO 10077-1	
DIMENSÕES	VIDRO	JANELA
1.300 x 1.300 mm	4/16/4 ($U_{t,w} = 2,7 \text{ W/m}^2\text{k}$) 4/16/4 baixo emissivo ($U_{t,w} = 1,5 \text{ W/m}^2\text{k}$)	$U_{t,w} = 2,3 \text{ W/m}^2\text{k}$ $U_{t,w} = 1,7 \text{ W/m}^2\text{k}$

Isolamento acústico

ENSAIO	DIMENSÕES	VIDRO	ÍNDICE PONDERADO DE REDUÇÃO SONORA
ROSENHEIM 161 21924/2.4.0	1.230x1.480 mm	4/16/4	$R_w (C;Ctr) = 34 (-1;-4) \text{ dB}$
ROSENHEIM 161 21924/2.0.0	1.230x1.480 mm	9/16/6	$R_w (C;Ctr) = 43 (-1;-4) \text{ dB}$
SWA GMBH L-LAD 05/044/02	1.230x1.480 mm	6+6/20/4+4	$R_w (C;Ctr) = 47 (-1;-4) \text{ dB}$

Análise comparativa de materiais de fechamentos

Transmitância térmica U

Material	U (W/m ² K)	
PVC VEKA (5 câmaras)*	1,3	As janelas de PVC VEKA isolam o dobro das de alumínio RPT
PVC (3 câmaras)	2,0	
Madeira	2,0 - 2,2	
Alumínio RPT 12 mm	3,2	
Alumínio RPT 4 mm	4,0	
Alumínio	5,7	

Fonte: UNE EN ISO 10077-1. * Fonte: ROSENHEIM 402 28226/1

Propriedades do PVC VEKA

COMPORTAMENTO AO FOGO: Segundo a norma UNE EN 13501-1:2002, o PVC veka tem a classificação B; S3; d0, (Ensaio LNE G090576). A norma anterior UNE 23727 qualifica-o como M1, material dificilmente inflamável (Ensaio CIDEMCO 3787).

RESISTÊNCIA QUÍMICA: Alta resistência e durabilidade frente à salinidade, radiação ultravioleta, poluição ambiental e chuva ácida.

VIDA ÚTIL: As janelas com perfis de PVC VEKA têm uma muito longa vida útil, segundo ensaios de envelhecimento acelerado.

VEKAPLAST Ibérica
 Pol. Ind. Villalonquejar • C/. López Bravo, 58 • 09001 BURGOS (Espana)
 Tel. 947 47 30 20 • Fax 947 47 30 21 • www.veka.es • www.veka.pt

Perfil de Calidad
 ★★★★★

FPP 03 01/12

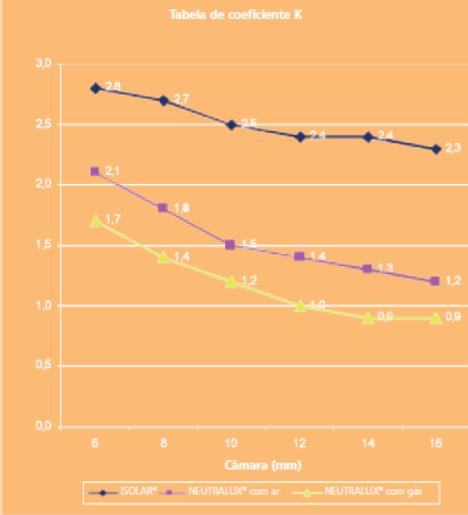
Ficha técnica do vidro duplo



INFORMAÇÃO TÉCNICA

TIPO DE VIDRO	τ_v TL (%)	τ_e TE (%)	g ES (%)	U (W/m ² K)	K (Kcal/hm ² C)	Atenuação acústica (dB)
FLOAT INCOLOR 4 mm	90	83	85	5.7	4.9	28
ISOLAR® GLAS 4 / 12 / 4	82	69	75	2.8	2.4	30
ISOLAR 4 / 12 / 4 NEUTRALUX®	80	53	62	1.6	1.4	30
ISOLAR NEUTRALUX®-S 4 / 12 / 4	74	48	53	1.6	1.4	30

Tabela de coeficiente K



Câmara (mm)	ISOLAR®	NEUTRALUX® com ar	NEUTRALUX® com gás
6	2.8	2.1	1.7
8	2.7	1.8	1.4
10	2.5	1.5	1.2
12	2.4	1.4	1.0
14	2.4	1.3	0.9
16	2.3	1.2	0.9

6

Ficha técnica do vidro triplo

Certificate

Passive House Suitable Component
For cool temperate climates, valid until 31. December 2014



Passive House Institute
Dr. Wolfgang Feist
64283 Darmstadt
GERMANY

Category **Glazing**

Manufacturer **SAINT-GOBAIN GLASS Deutschland GmbH**
52066 Aachen, Viktoriaallee 3-5, GERMANY

Product name: **SGG PLANITHERM ULTRA N**

This certificate was awarded based on the following criteria:

Thermal Comfort

$U_g \text{ (EN 673)} \leq 0.80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ [1]

Explanatory statement: in Passive Houses buildings with standard room height, no heating units are needed along the outer walls. In order to avoid thermal discomfort due to radiation heat losses, glazing U-values must be limited.

Energy Balance for glazings
for cool temperate climates

$U_g \text{ [W/m}^2\text{/K]} - 1.6 * g \leq 0$ [2]

Explanatory statement: Glazing on south facing facades with minimal shading must also provide net heat gains during the relatively short Passive House heating period (November to February).

Please note: Formula [2] is a rough estimation for this component in cool, temperate climates and thus reflects the energy balance for a very particular set of conditions. For the actual building the energy balance must be evaluated with the Passive House Planning Package (PHPP) or other suitable thermal simulation tool. The value given on the left hand side of formula [2] may not be used in place of the certified U_g -values given below.

Passive Houses Requirements

For proper function in a Passive House this glazings must be mounted into a well-insulated Passive House suitable window frame. A thermally separated spacer must be used at the glass edge to reduce thermal bridging.

Thermal quality and solar throughput:

Glazing Profile	$U_g \text{ (EN 673)}$ [W/(m ² K)]	$g \text{ (EN 410)}$ [-]
4:/12/4/12/:4 Ar 90%	0.72	0.50
4:/14/4/14/:4 Ar 90%	0.64	0.50
4:/16/4/16/:4 Ar 90%	0.58	0.50
4:/18/4/18/:4 Ar 90%	0.53	0.50

www.passivehouse.com

0474gl03-0477gl03



CERTIFIED COMPONENT
Passive House Institute

Ficha técnica do sistema de ventilação (1)

Certificate		Passive House Institut Dr. Wolfgang Feist 64283 Darmstadt GERMANY				
Passive House Suitable Component For cool temperate climates, valid until 31. December 2014						
Category:	Compact Heat Pump System					
Manufacturer:	Nilan A/S 8722 Hedensted, DENMARK					
Product name:	Compact P (172 m³/h)					
This certificate was awarded based on the following criteria (limit values*):						
Thermal Comfort:	$\theta_{\text{supply air}} \geq 16,5^{\circ}\text{C}$					
Heat Recovery of ventilation system:	$\eta_{\text{WRG,eff}} \geq 75\%$					
Electric efficiency ventilation system:	$P_{\text{el}} \leq 0,45 \text{ Wh/m}^3$					
Air tightness (internal/external):	$V_{\text{Leakage}} \leq 3\%$					
Total Primary Energy Demand (**):	$PE_{\text{total}} \leq 55 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$					
Control and calibration (*)						
Air pollution filters (*)						
Anti freezing strategy (*)						
Noise emission and reduction (*)						
Measured values to be used in PHPP (set point 172 m³/h) useful air flow rates 120 to 205 m³/h						
Heating						
Outside Air Temperature	T_{amb}	Test point 1	Test point 3	Test point 3	Test point 4	°C
Thermal Output Heating Heat Pump	P_{heating}	0.61	0.78	0.92		kW
COP number Heating Heat Pump	$\text{COP}_{\text{heating}}$	2.65	3.18	3.58		-
Maximum available supply air temperature with Heat Pump only(*)		28.6				°C
Hot water						
Outside Air Temperature	T_{amb}	Test point 1	Test point 3	Test point 3	Test point 4	°C
Thermal Output Heat Pump for heating up storage tank.	$P_{\text{DHW heating up}}$	0.60	0.83	0.99	1.14	kW
Thermal Output Heat Pump for reheating storage tank	$P_{\text{DHW reheating}}$	0.53	0.82	0.95	1.05	kW
COP Heat Pump for heating up storage tank	$\text{COP}_{\text{DHW heating up}}$	2.13	2.87	3.31	3.68	-
COP Heat Pump for reheating storage tank	$\text{COP}_{\text{DHW reheating}}$	1.81	2.72	3.05	3.28	-
Average storage tank temperature		50.5				°C
Specific storage heat losses		1.63				W/K
Exhaust air addition (if applicable)						m³/h
(*) detailed description of criteria and key values see attachment.						
(**) for heating, domestic hot water (DHW), ventilation, auxiliary electricity in the reference building, explanation see attachment.						
www.passivehouse.com		0391ch03				
		Heat Recovery $\eta_{\text{WRG,eff}} = 80\%$				
		Electric efficiency 0.40 Wh/m³				
		Air tightness $V_{\text{leak, internal}} = 1.0\%$ $V_{\text{leak, external}} = 1.1\%$				
		Frost protection down to -4°C				
		Total Primary Energy Demand (**) 51.4 kWh/(m²a)				
		  				
		CERTIFIED COMPONENT Passive House Institute				

Ficha técnica do sistema de ventilação (2)

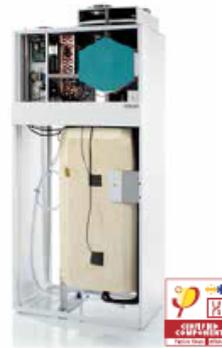
COMPACT P



Product description

Compact P is a passive house and energy-efficient total indoor climate solution for homes with a ventilation requirement of up to 325 m³/h. Compact P can be used in all types of low-energy houses, standard one-family houses, flats and small office areas in commercially leased premises, where easy installation is required, and where the focus is on an optimum indoor climate and minimum energy consumption.

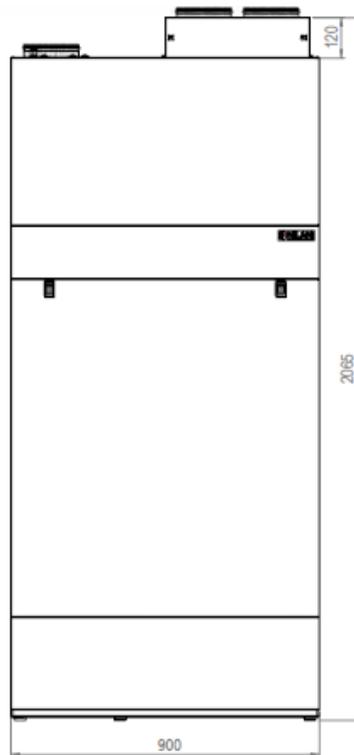
As standard, Compact P is built up with integrated CTS 602 control and operation panel, G4 filters, counter-flow



heat exchanger, a 180-litre SHW tank with supplementary heating element, 100% bypass damper and effective EC fans. The fans provide a constant air volume, with four-step adjustment. The unit has a built-in automatic defrosting function, moisture control and a filter replacement indicator.

Dimensional drawing

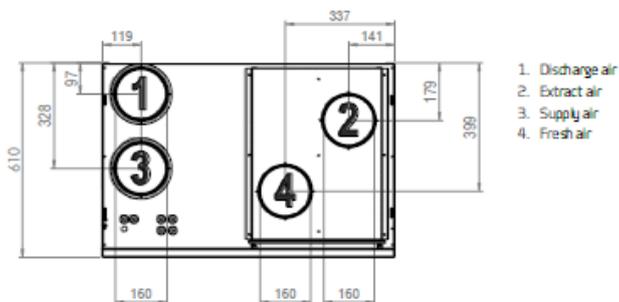
All dimensions are in mm



Technical specifications

Dimensions (W x D x H)	900 x 610 x 2,065 mm
Weight	202 kg
Panel type, cabinet	Aluzinc steel panel, white powder varnish RAL9016
Max. air volume (100 Pa)	325 m ³ /h
Heat exchanger type	Plastic counterflow exchanger
Fan type	EC, constant rotation
Filter class	Standard G4
Supplementary electrical heating (sanitary hot water)	1.5 Kw
Temperature efficiency (180 m ³ /h)*	85%
Supply voltage	230/10/50 Volt/Amp/Hz
Start current	9 Amp
Duct connections	Ø160 mm
Capacity SHW tank	180L
Connection dimension	3/4"

In accordance with EN308



Ficha técnica do sistema de ventilação (3)

PLANNING DATA

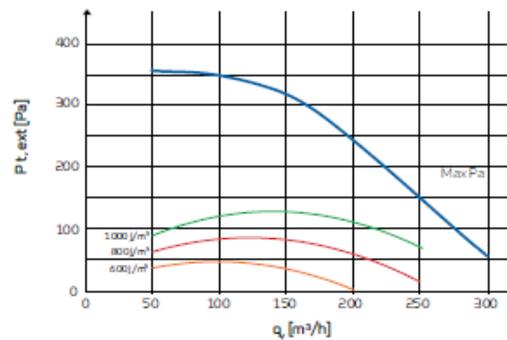
Capacity

Max. Pa capacity of standard unit, $p_{t,ext}$ as a function of q_v

SEL values in accordance with EN 13141-7 are for standard unit with G4 filters and exclusive heating element.

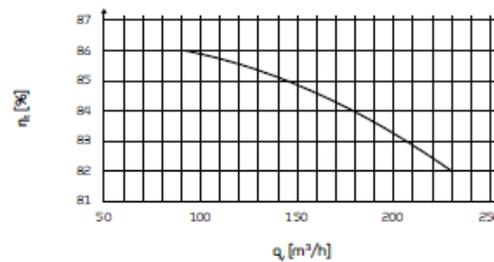
SEL values contain the unit's total electricity consumption for fans, including control with 40% deduction for exchangers in accordance with BE10

Conversion factor: $J/m^3 = 1/3.600 \times Wh/m^3$ or $1 W/m^3/h = 3600J/m^3$.



Temperature efficiency

Temperature efficiency η_t according to EN 308 as a function of volume flow q_v . Extract air $t_{11} = 25^\circ C$, fresh air $t_{21} = 5^\circ C$ (dry).

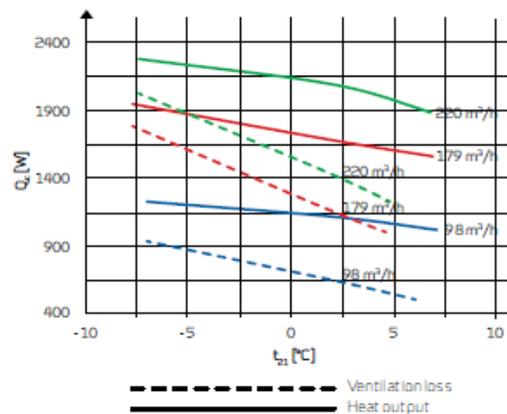


Heat output supply air

Heat output Q_c [W] as a function of q_v [m³/h] and outdoor air temperature t_{21} [°C]. In accordance with EN 14511, $t_{11} = 21^\circ C$ (extract air)

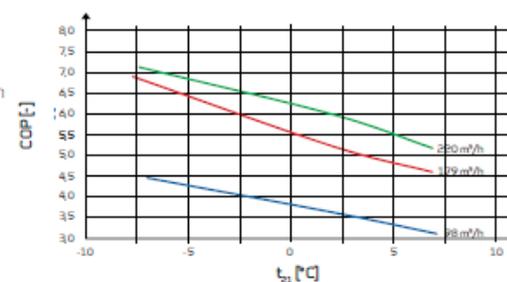
Heat output is the contribution to room heating added to the fresh air via Compact P to the supply air.

The ventilation loss is the heat output that is lost without heat recovery at the given volume flow air.



COP (air-air)

Heat output factor COP [-] supply air as a function of outdoor temperature t_{21} [°C] and volume flow q_v [m³/h] in accordance with EN14511 at a room temperature $t_{11} = 21^\circ C$



Anexo C - Resultados de Todos os Cenários Simulados para a Região de Aveiro

São apresentados os valores das necessidades energéticas para todos os modelos otimizados para a região de Aveiro. É também apresentada a percentagem de sobreaquecimento global do edifício. Recordando os limites da norma *Passive House* para necessidades de aquecimento e arrefecimento (15 kWh/m².a), e o limite de sobreaquecimento para o período de verão deverá ser inferior a 10%.

Modelo	Simulação	Energia [kWh/m ² .a]		Conforto
		Necessidades de Aquecimento	Necessidades de Arrefecimento	Sobreaquecimento (%)
Modelo Original + HVAC Comum	S_01	33.89	0.56	4.18
	S_02	33.89	3.25	12.94
	S_03	31.94	0.53	4.30
	S_04	31.94	3.15	14.22
	S_05	36.26	2.12	7.93
	S_06	36.26	6.64	15.23
	S_07	33.99	1.95	7.98
	S_08	33.99	6.16	15.41
	S_09	29.43	0.47	3.72
	S_10	29.43	3.45	16.47
	S_11	27.44	0.77	5.46
	S_12	27.44	3.38	17.24
	S_13	31.32	1.75	7.30
	S_14	31.32	6.62	17.77
	S_15	29.09	1.58	7.33
	S_16	29.09	6.16	18.34
	S_17	25.15	0.41	3.45
	S_18	25.15	3.81	20.16
	S_19	22.95	0.38	3.65
	S_20	22.95	3.73	21.54
	S_21	26.74	1.50	6.73
	S_22	26.74	6.81	21.03
	S_23	24.49	1.33	6.78
	S_24	24.49	6.36	22.21
	S_25	15.76	0.00	3.63
	S_26	15.76	0.00	6.38
	S_27	14.02	0.00	3.59
	S_28	14.02	0.00	6.27

Sistema HVAC HR + Ventilação Nocturna	S_29	17.73	0.00	6.28
	S_30	17.73	0.00	9.34
	S_31	15.73	0.00	6.26
	S_32	15.73	0.00	9.21
	S_33	12.16	0.00	3.53
	S_34	12.16	0.00	6.92
	S_35	10.49	0.00	3.50
	S_36	10.49	0.00	6.85
	S_37	13.72	0.00	6.01
	S_38	13.72	0.00	9.77
	S_39	11.79	0.00	5.99
	S_40	11.79	0.00	9.74
	S_41	8.91	0.00	3.47
	S_42	8.91	0.00	7.37
	S_43	7.30	0.00	3.41
	S_44	7.30	0.00	7.26
	S_45	10.08	0.00	5.79
	S_46	10.08	0.00	10.13
S_47	8.28	0.00	5.74	
S_48	8.28	0.00	10.02	
Sistema HVAC HR + ByPass	S_49	15.76	1.11	4.21
	S_50	15.76	1.09	13.71
	S_51	14.02	1.11	4.31
	S_52	14.02	1.09	14.29
	S_53	17.73	1.10	7.98
	S_54	17.73	1.08	15.31
	S_55	15.73	1.10	8.06
	S_56	15.73	1.08	15.49
	S_57	12.16	1.11	3.75
	S_58	12.16	1.08	16.63
	S_59	10.49	1.11	3.91
	S_60	10.49	1.08	17.50
	S_61	13.72	1.10	7.31
	S_62	13.72	1.07	17.81
	S_63	11.79	1.10	7.35
	S_64	11.79	1.07	18.55
	S_65	8.91	1.11	3.47
	S_66	8.91	1.07	20.52
	S_67	7.30	1.10	3.68
	S_68	7.30	1.07	22.04
	S_69	10.08	1.10	6.80
	S_70	10.08	1.07	21.28
	S_71	8.28	1.10	6.81

	S_72	8.28	1.07	22.56
Sistema HVAC HR + Ventilação Nocturna + ByPass	S_73	15.76	1.18	0.26
	S_74	15.76	1.15	3.79
	S_75	14.02	1.16	0.99
	S_76	14.02	1.15	3.60
	S_77	17.73	1.21	4.20
	S_78	17.73	1.14	8.12
	S_79	15.73	1.14	3.96
	S_80	15.73	1.13	7.72
	S_81	12.16	1.15	0.88
	S_82	12.16	1.14	4.20
	S_83	10.49	1.15	0.79
	S_84	10.49	1.14	3.91
	S_85	13.72	1.14	3.51
	S_86	13.72	1.12	8.49
	S_87	11.79	1.14	3.30
	S_88	11.79	1.12	8.10
	S_89	8.91	1.15	0.72
	S_90	8.91	1.13	4.65
	S_91	7.30	1.14	0.59
	S_92	7.30	1.14	4.37
	S_93	10.08	1.13	3.10
	S_94	10.08	1.11	8.85
	S_95	8.28	1.14	2.83
	S_96	8.28	1.12	8.54