

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Desempenho térmico de edifícios com materiais de reduzida  
energia incorporada – caso de estudo de um sistema  
construtivo modular pré-fabricado**

Sara Costa Marcelo

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dissertação orientada por:  
Professora Doutora Marta Oliveira Panão  
Arquiteto Bruno Duarte Dias



## Resumo

Segundo a Comissão Europeia, o sector dos edifícios é responsável por 40% do consumo de energia e 36% das emissões de CO<sub>2</sub> na União Europeia. Embora o desempenho energético de um edifício seja afetado por vários fatores, é a envolvente do edifício, o chamado “building envelope”, que desempenha o papel mais significativo, sendo responsável por cerca de 25% do total de uso de energia num edifício, o que inclui também toda a energia incorporada nos materiais constituintes, a energia gasta no transporte e durante a fase de construção. Assim, é de maior importância a aposta em desenvolvimentos de envolventes exteriores mais eficientes, uma vez que podem contribuir fortemente para a redução da energia relativa ao aquecimento e arrefecimento dos espaços.

A presente dissertação tem como principal objetivo o estudo do comportamento térmico de uma habitação unifamiliar constituída por paredes exteriores concebidas através de um sistema construtivo modular pré-fabricado, utilizando na sua maior parte materiais renováveis, no sentido de ter um baixo impacto ambiental, e uma elevada eficiência energética. Para isso são utilizados dois métodos de análise energética, o método quase estacionário e o software EnergyPlus. Pretende-se, igualmente, realizar análises comparativas entre este tipo de módulos e a solução construtiva mais comum em Portugal (parede de alvenaria dupla) em termos de coeficiente de transmissão térmica, quantidade de energia e CO<sub>2</sub> incorporados nos materiais e relativos ao seu transporte, e em relação à energia despendida durante a fase de operação da habitação.

Os resultados obtidos pelos dois métodos de análise revelaram uma diferença de carga de aquecimento de 17,3 kWh/m<sup>2</sup>.ano, concluindo-se que esta é sobredimensionada pelo regulamento. Quanto à análise da habitação em condições aproximadas ao real, esta mostrou que, em regime free-floating com ventilação natural, tem um bom desempenho térmico, uma vez que em 70% das horas num ano encontra-se dentro de uma gama de temperatura que proporciona conforto (20-25°C). Quanto à comparação entre o módulo de parede exterior da habitação com a solução construtiva de parede dupla, o primeiro revelou que, para além de um melhor coeficiente de transmissão térmica, tem uma menor percentagem de energia e CO<sub>2</sub> incorporado, uma menor energia associada ao transporte dos materiais constituintes e uma energia operacional também inferior.

**Palavras chave:** EnergyPlus, REH, simulação de edifícios, construção sustentável, materiais naturais



## **Abstract**

According to the European Commission, the buildings sector accounts for 40% of energy consumption and 36% of CO<sub>2</sub> emissions in the European Union. Although the energy performance of a building is affected by several factors, it is the building envelope which plays the most significant role, accounting for about 25% of the total energy use in a building. This includes all the energy incorporated in the constituent materials, the energy spent in transport and during the construction phase. Thus, the development of more efficient outdoor enclosures is of greater importance, since it can contribute greatly to the reduction of energy related to heating and cooling of the spaces.

The main objective of this dissertation is to study the thermal behavior of a single-family dwelling consisting of exterior walls designed through a prefabricated modular building system, using mostly renewable materials, in the sense of having a low environmental impact, and a high energy efficiency. For this, two methods of energy analysis are used, the quasi-stationary method and the EnergyPlus software. It is also intended to perform comparative analyzes between this type of modules and the most common constructional solution in Portugal (double masonry wall) in terms of coefficient of thermal transmissivity, amount of energy and CO<sub>2</sub> incorporated in the materials and related to their transport and in relation to the energy expended during the phase of operation of the dwelling.

The results obtained by the two methods of analysis revealed a heating load difference of 17.3 kWh/m<sup>2</sup>.year, concluding that this is oversized by the Portuguese regulation. Regarding the analysis of housing in real conditions, this showed that, in a free-floating regime with natural ventilation, it has a good thermal performance, since 70% of the hours in a year are within a comfortable temperature range (20-25°C). As for the comparison between the exterior wall module of the housing and the double walled building solution, the first one revealed that, in addition to a better coefficient of thermal conductivity, it has a lower percentage of energy and CO<sub>2</sub> incorporated, a lower energy associated with transport of the constituent materials and also lower operating energy.

**Key words:** EnergyPlus, REH, building simulation, sustainable construction, natural materials



# Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Acrónimos e Siglas .....	xiii
Simbologia e Notações.....	xv
Capítulo 1. Introdução .....	1
1.1 Enquadramento geral .....	1
1.2 Objetivos e estrutura da dissertação .....	3
Capítulo 2. Conceitos teóricos .....	5
2.1 Transferência de calor.....	5
2.2 Balanço térmico dos edifícios .....	8
2.3 Ventilação natural .....	11
2.4 Conforto térmico.....	12
Capítulo 3. Métodos de análise energética.....	13
3.1 Método quase-estacionário .....	13
3.1.1 Necessidades energéticas.....	14
3.2 EnergyPlus.....	18
Capítulo 4. Caso de estudo.....	21
4.1 Análise do local e climática .....	21
4.2 Descrição do edifício .....	23
4.3 Orientação e envidraçados .....	25
4.4 Proteções solares e vegetação .....	26
4.5 Materiais utilizados.....	28
4.5.1 Telha para revestimento.....	28
4.5.2 Madeira.....	29
4.5.3 Isolamento térmico .....	30
4.6 Soluções construtivas.....	33
4.6.1 Paredes, pavimentos e cobertura.....	33
4.6.2 Envidraçados .....	35
Sistemas de climatização.....	35
4.7.....	35
Capítulo 5. Caracterização das soluções construtivas de fachadas .....	38
5.1 Tipos de construção .....	38
5.1.1 Sistema ETICS .....	38
5.1.2 Parede de alvenaria dupla .....	39
5.1.3 Parede pré-fabricada para o projeto em estudo .....	40
Capítulo 6. Comportamento térmico de fachadas .....	42
6.1 Sistema ETICS.....	42
6.2 Parede dupla.....	42
6.3 Parede pré-fabricada para o projeto em estudo .....	43
Capítulo 7. Simulação Térmica.....	48
7.1 Modelo geométrico .....	48
7.2 Zonamento térmico .....	49
7.3 Soluções construtivas e sombreamento.....	49
7.4 Modelação do solo .....	51

7.5	Ganhos internos .....	52
7.5.1	Ocupação .....	52
7.5.2	Equipamentos elétricos.....	53
7.5.3	Iluminação .....	53
7.6	Sistema Ideal Loads .....	54
7.7	Infiltração.....	55
7.8	Ventilação natural .....	55
7.9	Variáveis solicitadas ao EnergyPlus (Output Reporting).....	57
Capítulo 8.	Resultados e Análise das simulações .....	60
8.1	Calibração dos dados climáticos nos modelos .....	60
8.2.1	Comparação do modelo de inverno .....	60
8.2.1	Comparação do modelo de Verão.....	62
8.2	REH vs EnergyPlus - Resultados.....	63
8.2.1	Estação de aquecimento.....	64
8.2.2	Estação de arrefecimento .....	66
8.3	Comportamento térmico da habitação em condições reais .....	66
8.3.1	Anual .....	67
8.3.2	Estação de Arrefecimento.....	74
8.3.3	Estação de Aquecimento.....	77
Capítulo 9.	Ciclo de vida dos edifícios .....	80
9.1	Análise da energia e CO <sub>2</sub> incorporados.....	81
9.1.2	Energia e CO <sub>2</sub> incorporado nos materiais.....	83
9.1.2	Energia associada ao transporte.....	88
9.2	Análise da energia operacional .....	90
Capítulo 10.	Conclusão.....	96
Referências.....		98
Anexos .....		102
Anexo 1:	Folha de cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento....	102
Anexo 2:	Folha de cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento..	104
Anexo 3:	Cálculo da Energia incorporada em cada material constituinte da fachada com revestimento em madeira.....	106
Anexo 4:	Cálculo da Energia incorporada em cada material constituinte da fachada com revestimento em telha cerâmica .....	107
Anexo 5:	Energia e Co <sub>2</sub> incorporados na parede de alvenaria dupla .....	108
Anexo 6:	Folha de cálculo “Anos meteorológicos de referência para simulação dinâmica”.....	108

## Índice de Figuras

Figura 1.1 Componentes da envolvente dos edifícios “building envelope” - [2] .....	1
Figura 1.2 Redução da energia para aquecimento e arrefecimento devido à otimização da envolvente dos edifícios - [2].....	2
Figura 1.3 Exemplo de uma habitação construída com fardos de palha em França .....	3
Figura 2.1 – Mecanismos de transferência de calor – adaptado de [6].....	5
Figura 2.2 – Transferência de calor unidimensional [6].....	6
Figura 2.3 – Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção – adaptado de [6].....	7
Figura 2.4 Trocas radiativas numa superfície [6] .....	8
Figura 2.5 Balanço térmico de um edifício no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - [76] .....	10
Figura 2.6 Esquema de ventilação natural - [73].....	11
Figura 2.7 Intervalos de aceitação de temperaturas operativas de acordo com o standard 55-2010 da ASHRAE – adaptado de [74] .....	12
Figura 3.1 Etapas de simulação em EnergyPlus – adaptado de [79] .....	20
Figura 4.1 Perfil de temperatura exterior máxima e mínima (média diária).....	22
Figura 4.2- Frequência anual de ocorrência de temperaturas .....	22
Figura 4.3 – Radiação solar incidente (média mensal diária).....	23
Figura 4.4 Vista frontal da habitação .....	23
Figura 4.5 Planta do piso térreo da habitação.....	24
Figura 4.6 Planta do primeiro piso da habitação .....	24
Figura 4.7 Incidência da radiação solar no inverno (esquerda) e verão (direita) - [18].....	25
Figura 4.8 Fachada Sul da habitação .....	26
Figura 4.10 Corte lateral da habitação – vista do telheiro e extensão do telhado .....	27
Figura 4.11 Construção básica de uma parede com fardos de palha – [77].....	31
Figura 4.12 Aglomerado de cortiça expandida (esquerda) e granulado de cortiça (direita) - [33] .....	32
Figura 5.1 Representação do sistema ETICS. ....	38
Figura 5.2 Representação do sistema de parede dupla .....	40
Figura 5.3 Esquema da assemblagem e montagem dos módulos .....	40
Figura 5.4 Representação da habitação em fase de construção .....	40
Figura 6.1 Materiais constituintes da fachada da habitação em estudo .....	43
Figura 6.2 Representação da solução construtiva da fachada da habitação em estudo.....	44
Figura 6.3 Esquema representativo das resistências térmicas consideradas.....	44
Figura 6.4 Esquema representativo da estrutura reticulada formada pelos ripados de madeira .....	45
Figura 7.1 Desenho Sketchup da habitação em estudo.....	48
Figura 7.2 Desenho Sketchup da habitação em estudo – perspetivas.....	48

Figura 7.3 Zonamento do hall de entrada real (esquerda) e simplificado (direita) .....	49
Figura 8.3 Temperatura operativa da cozinha com e sem os dispositivos de sombreamento.....	68
Figura 8.4 Temperatura operativa da sala com e sem os dispositivos de sombreamento .....	68
Figura 8.5 Temperatura operativa dos quartos com e sem os dispositivos de sombreamento.....	68
Figura 8.6 Valores de radiação transmitida para a sala com e sem dispositivos de sombreamento .....	69
Figura 8.7 Valores de radiação transmitida para os quartos com e sem dispositivos de sombreamento .....	70
Figura 8.8 Histograma de temperaturas da habitação em regime free-floating .....	70
Figura 8.9 Perfil da temperatura operativa da sala em regime de ventilação natural .....	71
Figura 8.10 Taxa de renovação do ar dentro da sala .....	71
Figura 8.11 Perfil da temperatura operativa da cozinha em regime de ventilação natural .....	72
Figura 8.12 Taxa de renovação do ar dentro da cozinha .....	72
Figura 8.13 Perfil da temperatura operativa dos quartos (média) em regime de ventilação natural.....	72
Figura 8.14 Taxa de renovação do ar dentro dos quartos (média).....	73
Figura 8.15 Histograma de temperaturas da habitação em regime de ventilação natural.....	73
Figura 8.17 Histograma de temperaturas na estação de arrefecimento - regime com ventilação natural.....	75
Figura 9.1 Esquema do ciclo de vida de um edifício.....	80
Figura 9.2 Esquema do processo da criação do inventário de Carbono e Energia. ....	82
Figura 9.3 Esquema representativo da estrutura reticulada formada pelos ripados de madeira .....	83
Figura 9.6 Energia utilizada na produção de isolamentos térmicos - [59].....	87
Figura 9.8 Variação da temperatura interior (sala), temperatura exterior e perdas pela envolvente opaca da sala (habitação típica) .....	93
Figura 9.9 Variação da energia fornecida para aquecimento (para a sala) e da temperatura exterior....	94

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Valores de PMV (escala de sensibilidade térmica).....	12
Tabela 4.1 Principais áreas do projeto em estudo .....	23
Tabela 4.2 Propriedades dos materiais das soluções construtivas opacas utilizadas .....	33
Tabela 4.3 (continuação) Propriedades dos materiais das soluções construtivas opacas da habitação em estudo .....	34
Tabela 4.4 Propriedades dos vidros utilizados na habitação em estudo .....	35
Tabela 4.5 Características do equipamento de climatização .....	35
Tabela 4.6 Características dos depósitos termoacumuladores .....	35
Tabela 6.1 Valores do coeficiente de transmissão térmica do sistema ETICS. ....	42
Tabela 6.2 Valores de coeficiente de transmissão térmica do sistema de parede dupla .....	42
Tabela 6.3 Valores do coeficiente de transmissão térmica do módulo para cada tipo de isolamento....	46
Tabela 7.1 Resistência de espaços de ar consoante a direção e fluxo do calor e espessura.....	50
Tabela 7.2 Propriedades óticas dos vidros considerados no modelo .....	50
Tabela 7.3 Propriedades de cortinas interiores – ASHRAE (2001).....	51
Tabela 7.4 Padrão de ocupação das zonas – adaptado de [39] .....	52
Tabela 7.5 Consumos de energia elétrica e potência média para a utilização de um conjunto de equipamentos eficientes existentes numa habitação .....	53
Tabela 7.6 Padrões de iluminação .....	54
Tabela 7.7 Parâmetros utilizados para cálculo das cargas elétricas de climatização - [41] .....	55
Tabela 8.1 Duração das estações de aquecimento e arrefecimento dos métodos utilizados.....	61
Tabela 8.2 Valores de temperatura média exterior e graus-dias obtidos pelos dois métodos de simulação.....	62
Tabela 8.3 valores de energia acumulada na estação de arrefecimento obtidos pelos dois métodos de simulação.....	63
Tabela 8.4 Valores das cargas obtidas através dos dois métodos de cálculo.....	63
Tabela 8.5 Comparação dos valores do REH e EnergyPlus (Inverno). ....	64
Tabela 8.6 Valores de cargas de aquecimento e arrefecimento obtidos por simulação em EnergyPlus	74
Tabela 8.7 Percentagem de horas, dentro do horário de ocupação, com temperatura superior a 28°C (regime free-floating sem ventilação natural).....	76
Tabela 8.8 Percentagem de horas, dentro do horário de ocupação, com temperatura superior a 28°C (regime free-floating com ventilação natural) .....	76
Tabela 8.9 Percentil 99 da diferença entre a temperatura operativa e a de referência para cada zona no horário de ocupação .....	76
Tabela 8.10 Carga de arrefecimento para diferentes cenários. ....	77
Tabela 8.11 Carga de aquecimento para todo o ano e apenas para o período de ocupação.....	77

Tabela 8.12 Carga de arrefecimento na estação de aquecimento .....	78
Tabela 9.1 Designação e valores de energia e CO <sub>2</sub> incorporado dos materiais retirados do inventário de Bath utilizados no estudo. ....	84
Tabela 9.2 valores de energia incorporada por m <sup>2</sup> das soluções construtivas estudadas .....	84
Tabela 9.3 Valores de massa volúmica, energia incorporada e CO <sub>2</sub> incorporado para os materiais constituintes do sistema ETICS.....	86
Tabela 9.4 Valores de massa volúmica, energia incorporada e CO <sub>2</sub> incorporado dos materiais estudados. ....	87
Tabela 9.5 Valores de energia associado aos tipos de transporte – adaptado de [52].....	88
Tabela 9.6 Peso de alvenarias de tijolo para várias dimensões [56].....	90
Tabela 9.7 Energia associada ao transporte para cada tipo de fachada.....	90
Tabela 9.8 Soluções construtivas comuns em Portugal.....	92
Tabela 9.9 Cargas de aquecimento/arrefecimento para a habitação com as soluções comuns em Portugal .....	92
Tabela 9.10 Resultados da energia operacional para os dois modelos.....	93

## **Acrónimos e Siglas**

<b>ASHRAE</b>	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
<b>AQS</b>	Águas Quentes Sanitárias
<b>COP</b>	Coefficient of Performance
<b>ETICS</b>	External Thermal Insulation Composite Systems
<b>LNEC</b>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
<b>LNEG</b>	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
<b>RCCTE</b>	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
<b>REH</b>	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
<b>RSECE</b>	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
<b>UE</b>	União Europeia



## Simbologia e Notações

$A_s$	Área da superfície do corpo [ $m^2$ ]
$A_v$	Área do vão envidraçado [ $m^2$ ]
$A_n$	Área da superfície n, [ $m^2$ ]
$A_{s,i_{nj}}$	Área efetiva coletora de radiação do vão envidraçado na superfície n com a orientação j, [ $m^2$ ]
$A_p$	Área interior útil de pavimento do edifício medida pelo interior, [ $m^2$ ]
$A_{s,v_{nj}}$	Área efetiva coletora de radiação solar da superfície do elemento n com a orientação j, [ $m^2$ ]
$c_p$	Calor específico, [J/kg.K]
$F_{s,i}$	Fator de obstrução do vão envidraçado;
$F_{s,v_{nj}}$	Fator de obstrução da superfície do elemento n, com a orientação j
$G_{sul}$	Energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a Sul, durante a estação de aquecimento, por unidade de superfície, [kWh/ $m^2$ .mês]
<b>GD</b>	Graus-dia
$h_c, h_i$	Coefficiente de transferência de calor por convecção, [W/ $m^2$ K]
$h_r$	Coefficiente de transferência de calor por radiação, [W/ $m^2$ .K]
$H_{tr,v}$	Coefficiente global de transferência de calor por condução através de toda a superfície dos elementos da envolvente no Verão, [W/ $^{\circ}$ C]
$I_{sol,j}$	Energia solar média incidente numa superfície com orientação j durante toda a estação de arrefecimento, [kWh/ $m^2$ ]
<b>k</b>	Condutividade térmica do material, [W/m.K]
$L_v$	Duração da estação de arrefecimento, [h]
<b>M</b>	Duração média da estação convencional de aquecimento
$m_i$	Caudal mássico da zona i, [kg/s]
$N_{ic}$	Necessidades nominais de energia útil para aquecimento, [kWh/ $m^2$ ]
$N_{vc}$	Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento, [kWh/ $m^2$ ]
$P_d$	Pé direito médio da fração, [m]
$\dot{Q}_{aux}$	Energia auxiliar fornecida/extraída ao sistema, [J]
$\dot{Q}_c$	Ganhos de climatização, [W]
$\dot{Q}_i$	Ganhos internos, [W]
$\dot{Q}_{in}$	Taxa de calor que entra no volume de controlo, [W/ $m^2$ ]

$\dot{Q}_{int}$	Energia gerada no interior do volume, [J]
$Q_{int}$	Ganhos térmicos associados a fontes internas de calor, [kWh]
$Q_{int,v}$	Ganhos térmicos associados a fontes internas de calor, [kWh]
$Q_{g,i}$	Ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento, [kWh]
$Q_{g,v}$	Ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento, [kWh]
$Q_{gu,i}$	Ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento resultantes dos ganhos solares através dos envidraçados, da iluminação, dos equipamentos e dos ocupantes, [kWh]
$\dot{Q}_{out}$	Fluxo de calor que sai do volume de controlo, [W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{Q}_s$	Ganhos solares, [W]
$\dot{Q}_{sis}$	Carga térmica do sistema AVAC, [W]
$Q_{sol}$	Ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos envidraçados, [kWh]
$Q_{sol,v}$	Ganhos térmicos associados à radiação solar incidente na envolvente exterior opaca e envidraçados, [kWh]
$q_{rad}$	Calor emitido por uma superfície, [W]
$q_{rad(1-2)}$	Troca radiativa entre dois corpos, [W]
$\dot{Q}_v$	Trocas de calor devido à ventilação do espaço, [kWh]
$Q_{ve}$	Transferência de calor por ventilação, [kWh]
$Q_{ve,i}$	Transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento, [kWh]
$Q_{ve,v}$	Transferência de calor por ação da renovação do ar interior na estação de arrefecimento, [kWh]
$Q_{tr}$	Transferência de calor por transmissão através da envolvente do edifício, na estação em estudo, [kWh]
$Q_{tr,i}$	Transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento através da envolvente dos edifícios na estação de aquecimento, [kWh]
$q''_x$	Fluxo de calor por condução, [W/m <sup>2</sup> ]
$q''_{conv}$	Fluxo de calor por convecção, [W/m <sup>2</sup> ];
$T_i$	Temperatura interior, [°C]
$T_e$	Temperatura exterior, [°C]
$T_{ins}$	Temperatura de insuflação do ar, [°C]

$T_s$	Temperatura da superfície, [K];
$T_z$	Temperatura da zona, [K]
$T_\infty$	Temperatura do fluido exterior à camada limite [K]
$T_s$	Temperatura do corpo, [K]
$T_1$	Temperatura do corpo 1, [K]
$T_{surr}$	Temperatura ambiente, [K]
$U_n$	Coefficiente de transmissão térmica da superfície n, [W/m <sup>2</sup> .K]
$V_s$	Volume, [m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}$	Caudal do fluido, [m <sup>3</sup> /s]
$X_j$	Fator de orientação para as diferentes exposições
$\Delta T$	Varição da temperatura, [K]
$\Delta t$	Varição do tempo, [s]
$\varepsilon$	Emissividade do corpo
$\eta_i$	Fator de utilização dos ganhos térmicos estação de aquecimento
$\eta_v$	Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento
$\theta_{ref,v}$	Temperatura de referência na estação de arrefecimento, [°C]
$\theta_{ext,v}$	Temperatura média do ar exterior para a estação de arrefecimento, [°C]
$\rho$	Massa volúmica, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, [W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]



## Capítulo 1. Introdução

### 1.1 Enquadramento geral

Com o intuito de fazer frente às alterações climáticas provocadas pelo aumento do efeito de estufa, países de todo o mundo têm investido esforços no desenvolvimento e utilização de recursos de energia renováveis e de técnicas de eficiência energética, de forma a reduzir o consumo de energia primária e as emissões de CO<sub>2</sub>. Segundo a Comissão Europeia, o sector dos edifícios é responsável por 40% do consumo de energia e 36% das emissões de CO<sub>2</sub> na União Europeia, sendo que um aumento da eficiência energética neste sector pode significar uma redução em 5-6% da energia consumida e uma redução das emissões de CO<sub>2</sub> de 5% [1]. Dentro de toda a energia despendida num edifício, o aquecimento e arrefecimento dos espaços correspondem a cerca de 30% desse total, sendo por isso essencial que este facto esteja presente durante o processo de conceção do design do edifício. Assim, devem-se maximizar os ganhos solares no inverno para minimizar as necessidades de aquecimento (e iluminação). Quanto às necessidades de arrefecimento, estas podem ser reduzidas através da minimização dos ganhos solares obtida por uma boa inércia térmica, um bom isolamento térmico (mais importante no Inverno), um adequado sistema de sombreamento e ventilação natural [2].

Felizmente, hoje em dia os edifícios já são projetados tendo como uma das principais prioridades um bom desempenho energético, tendo assim o potencial para reduzir em 50-60% o consumo de energia durante o seu ciclo de vida. Segundo [3], a avaliação do desempenho energético dos edifícios pode ser dividida em cinco partes: envolvente, que consiste nos elementos que separam o ar interior do exterior (portas, paredes e janelas exteriores e telhado), sistema AVAC, sistema de aquecimento de águas, equipamento elétrico e iluminação. Embora o desempenho energético de um edifício seja afetado por vários fatores, é a envolvente do edifício, o chamado “building envelope”, que desempenha o papel mais significativo, sendo responsável por cerca de 25% do total de uso de energia num edifício, o que inclui toda a energia incorporada nos materiais constituintes, a energia gasta no transporte e durante a fase de construção [4].

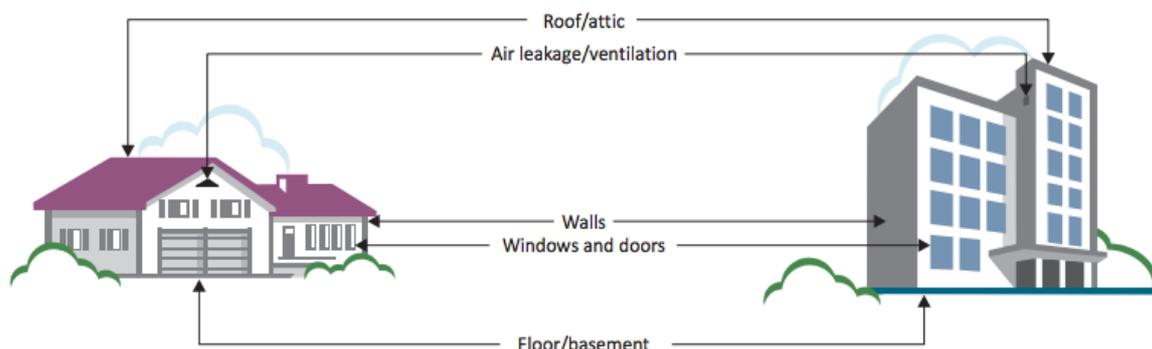


Figura 1.1 Componentes da envolvente dos edifícios “building envelope” - [2]

Segundo a Agência Internacional de Energia, um dos grandes objetivos é reduzir para metade as emissões de CO<sub>2</sub> até 2050, ajudando assim a limitar o aumento da temperatura média global para não mais que 2°C, o chamado cenário 2DS. Para estes objetivos serem atingidos, todos os setores têm que agir, e no que toca ao sector dos edifícios, a aposta em desenvolvimentos de envolventes exteriores mais eficientes pode contribuir fortemente para a redução da energia relativa ao aquecimento e arrefecimento dos espaços, como pode ser observado na figura 1.2.

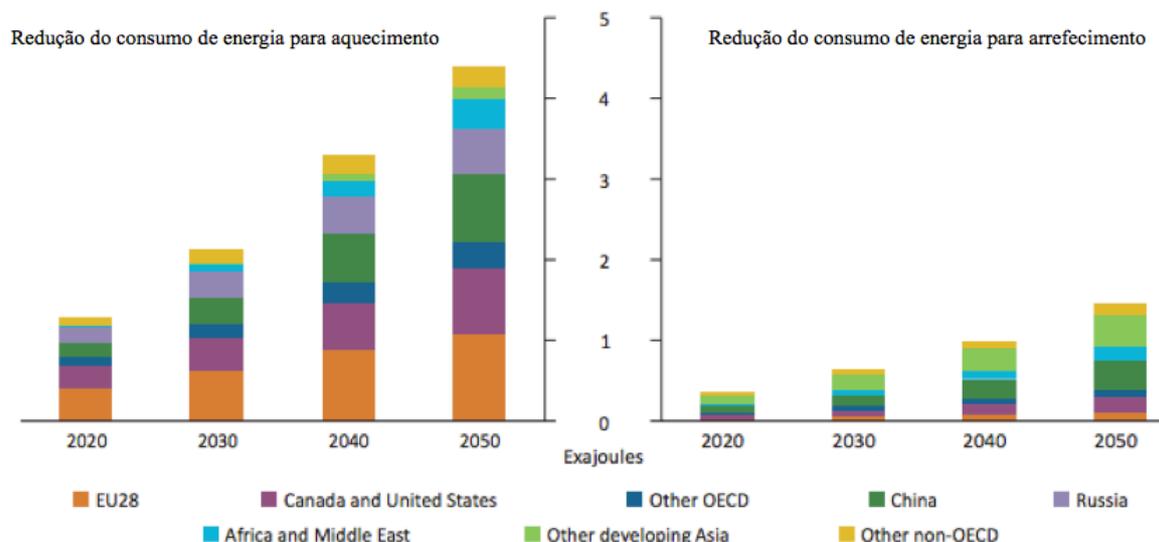


Figura 1.2 Redução da energia para aquecimento e arrefecimento devido à otimização da envolvente dos edifícios - [2]

Assim, de forma a diminuir tanto a energia incorporada nos edifícios como a energia gasta durante a sua fase operacional, é extremamente importante uma escolha cuidada dos materiais a serem utilizados. Para além de um bom desempenho térmico, é desejável que os materiais sejam de origem natural e que possam ser reutilizados, de forma a não serem detentores de grandes quantidades de energia e CO<sub>2</sub> incorporados. Para além disso, convém ter em consideração se estes materiais são produzidos localmente, uma vez que uma menor distância até ao local de construção equivale a um menor consumo de energia derivado do transporte.

Assim, estes materiais não poluentes no que diz respeito a emissões tóxicas ou resíduos, podendo ser reutilizados ou reciclados, têm também uma característica em comum, que é o de atuarem como “sequestradores de carbono”, tornando-se assim aliados da mitigação dos efeitos das alterações climáticas antropogénicas, ao contrário dos produtos convencionais. Destes materiais têm-se destacado a madeira e os seus derivados, a cortiça, o cânhamo, as fibras vegetais (coco, celulose, linho), provenientes de florestas ou culturas rotativas, para fins não alimentares, tendencialmente abundantes e geradores de riqueza total [5]. Para além destes materiais, tem-se destacado como uma boa alternativa para isolamento térmico os fardos de palha, no sentido em que combina uma elevada eficiência energética com baixo impacto ambiental e elevada durabilidade, comprovada pela existência de algumas construções centenárias localizadas principalmente nos Estados Unidos. Na Europa, o exemplo mais conhecido é o da Maison Feuillette, em França (figura 1.3).



Figura 1.3 Exemplo de uma habitação construída com fardos de palha em França

## 1.2 Objetivos e estrutura da dissertação

A presente dissertação tem como principal objetivo o estudo do comportamento térmico de uma habitação unifamiliar constituída por paredes exteriores concebidas através de um sistema construtivo pré-fabricado modular, utilizando na sua maior parte materiais renováveis, no sentido de ter um baixo impacto ambiental, elevada eficiência energética e um bom desempenho no âmbito do conforto hidrotérmico e acústico. Procura-se, igualmente, fazer uma comparação entre este sistema construtivo e soluções de fachada mais correntes em Portugal (como o sistema ETICS e parede de alvenaria dupla). Para isso será feita uma análise ao desempenho térmico (cálculo do coeficiente de transmissão térmica), à quantidade de energia e CO<sub>2</sub> incorporados e à energia gasta na fase de operação no seu tempo de vida. Na elaboração deste trabalho serão utilizadas duas metodologias distintas, tanto para a análise das trocas através da envolvente da habitação como das necessidades de climatização desta. Os métodos utilizados são um software de análise dinâmica (EnergyPlus) e o método simplificado do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), procurando-se estabelecer uma comparação entre os dois e, principalmente, analisar como o regulamento trata habitações com este tipo de especificidades.

Foi adotada a seguinte estrutura para a organização do trabalho:

- No capítulo 2 são apresentados os conceitos teóricos necessários a uma melhor compreensão do tema estudado. Assim, é feita uma descrição das formas de transferência de calor e do balanço térmico de edifícios e dadas algumas noções sobre ventilação natural e conforto térmico.
- No capítulo 3 são apresentados os métodos de análise energética utilizados na execução desta dissertação. Desta forma, será explicado como o REH e o EnergyPlus executam o seu balanço energético de forma a contabilizar o total de necessidades de aquecimento e arrefecimento.
- No capítulo 4 é apresentado o caso de estudo, nomeadamente o clima e local da habitação e sua caracterização (áreas, plantas, soluções construtivas, etc).

- No capítulo 5 é feita uma caracterização dos dois tipos de fachadas mais utilizadas em Portugal (sistema ETICS e alvenaria dupla) e do sistema construtivo pré-fabricado modular, sendo que no capítulo 6 é estudado o comportamento térmico de cada uma.
- No capítulo 7 é feita uma descrição dos procedimentos feitos para a concretização da simulação térmica da habitação em EnergyPlus.
- No capítulo 8 serão mostrados os resultados obtidos através da folha de cálculo simplificado (REH) e através do software, sendo que primeiramente é feita uma calibração dos dados climáticos para que as simulações tenham por base os mesmos dados. No mesmo capítulo são mostrados os resultados obtidos de simulação através do EnergyPlus para a habitação em condições consideradas reais, sendo feita posteriormente a sua análise.
- No capítulo 9 é abordado o tema do ciclo de vida dos edifícios, onde são feitos os cálculos referentes à energia e CO<sub>2</sub> incorporados nas fachadas estudadas e uma comparação entre a energia operacional gasta pela habitação em estudo e uma habitação com soluções construtivas mais típicas em Portugal.
- As conclusões do trabalho são apresentadas no capítulo 10.

## Capítulo 2. Conceitos teóricos

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos teóricos necessários para uma melhor compreensão desta dissertação. Serão apresentados os processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação, bem como o balanço térmico dos edifícios. Também serão discutidos os conceitos de ventilação natural, ganhos solares e ganhos internos e abordada a questão do conforto térmico.

### 2.1 Transferência de calor

A energia pode ser transmitida através de interações de um sistema para a sua vizinhança através de trabalho e/ou calor, sendo que, para esta dissertação, a parcela de calor é a única a considerar. A transferência de calor (energia térmica) corresponde à fração da energia interna de um corpo que pode ser transferida devido à existência de um gradiente térmico – diferentes temperaturas em diferentes pontos - de forma a atingir-se um equilíbrio. Esta transferência de calor ocorre no sentido das zonas onde a temperatura é inferior e pode dar-se por condução, convecção e radiação [6].



Figura 2.1 – Mecanismos de transferência de calor – adaptado de [6]

A condução é um processo de transferência de calor em que o calor é transferido através da agitação microscópica, desde as partículas que se encontram na região de temperatura mais elevada e, conseqüentemente, com uma maior energia interna, para as partículas adjacentes com uma menor energia. Assim, na presença de um gradiente térmico, a transferência de calor por condução ocorre na direção da temperatura inferior e é dado pela lei de Fourier:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

$q''_x$  – Fluxo de calor por condução [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$k$  – Condutividade térmica do material [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]

$\frac{dT}{dx}$  – Gradiente de temperatura [ $\text{K}/\text{m}$ ]

O sinal negativo na equação 2.1 indica o sentido do fluxo de calor, sendo considerado positivo quando a transferência se faz no sentido da temperatura mais baixa. A figura 2.2 demonstra a condução de calor expressa pela lei de Fourier [6]:

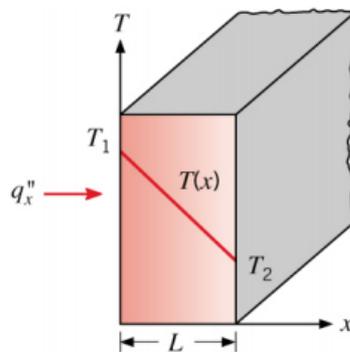


Figura 2.2 – Transferência de calor unidimensional [6]

A transferência de calor por convecção ocorre entre um fluido (líquido ou gasoso) em movimento e uma superfície adjacente quando estão a diferentes temperaturas. O efeito convectivo pode ser classificado como forçado quando o movimento do fluido é causado por diferenças de pressão induzidas externamente pelo vento ou internamente por um ventilador. Pelo contrário, este efeito diz-se natural quando se deve a diferenças de densidade causadas pela variação de temperatura e à impulsão térmica, como por exemplo quando num espaço fechado interior, o pavimento aquecido pela radiação solar incidente aquece o ar que lhe está adjacente.

Qualquer que seja o tipo de processo de transferência de calor, a energia transferida por convecção é quantificada pela equação 2.2, designada por lei do arrefecimento de Newton:

$$q''_{conv} = h_c(T_s - T_\infty) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

$q''_{conv}$  – Fluxo de calor por convecção [ $W/m^2$ ];

$h_c$  – Coeficiente de transferência de calor por convecção [ $W/m^2K$ ] que depende da geometria da superfície, da natureza do escoamento do fluido e das propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido;

$T_s$  – Temperatura da superfície [K];

$T_\infty$  - Temperatura do fluido exterior à camada limite [K].

Assim como a transferência de calor por convecção, a por radiação assegura a distribuição de calor pelo espaço, no entanto são mecanismos físicos de transferência de calor muito distintos. Para a convecção de um fluido com uma superfície é importante conhecer as condições nas proximidades do elemento, enquanto que para o processo radiativo importa conhecer a disposição de todas as superfícies no espaço fechado, assim como a emissividade das mesmas.

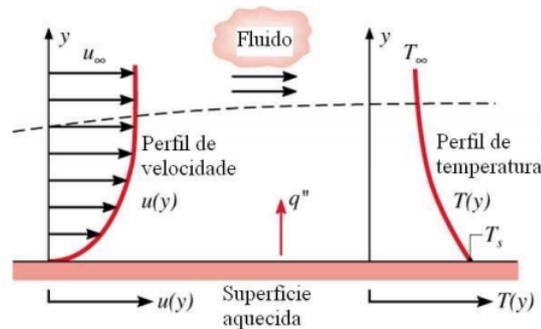


Figura 2.3 – Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção – adaptado de [6]

Desta forma, todos os corpos que estejam a uma temperatura diferente do zero absoluto (K) emitem energia que é transportada por ondas eletromagnéticas (ou, alternativamente, por fótons), devido a mudanças das configurações eletrônicas dos seus átomos ou moléculas. Embora a radiação tenha origem na matéria, o seu transporte não exige a presença de um meio material, sendo até o transporte radiativo mais eficiente no vácuo.

O calor emitido por uma superfície está relacionado com a sua emissividade, sendo expresso por:

$$q_{rad} = A_s \varepsilon \sigma T_s^4 \quad [W/m^2] \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

$A_s$  – Área da superfície do corpo [ $m^2$ ];

$\varepsilon$  – Emissividade do corpo;

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann,  $5.67 \times 10^{-8}$  [ $W/m^2.K$ ];

$T_s$  – Temperatura do corpo [K].

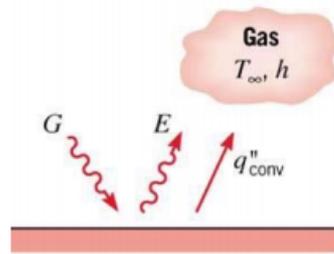


Figura 2.4 - Trocas radiativas numa superfície [6]

Quanto à troca radiativa entre dois corpos, esta pode ser representada por:

$$q_{rad} = A_S h_r (T_s - T_{surr}) \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde:

$h_r$  – Coeficiente de transferência de calor por radiação [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ];

$T_s$  – Temperatura do corpo [K];

$T_{surr}$  – Temperatura do ambiente [K].

## 2.2 Balanço térmico dos edifícios

O consumo energético de um edifício é influenciado por diversos fatores, nomeadamente pelas condições climáticas do local (temperatura, radiação solar, humidade, velocidade do vento), pela geometria e características do edifício (número de janelas, orientação, sombreamentos) e dos seus materiais constituintes (propriedades térmicas e físicas), pelo perfil de ocupação, pelas das eficiências dos subsistemas (como a iluminação e equipamentos elétricos) e pelos respetivos horários de utilização [7].

A lei da conservação da energia em condições estacionárias, exige que, para um dado instante  $dt$ , o balanço de energia num qualquer volume de controlo delimitado por uma fronteira seja sempre nulo [8]:

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{in} \quad \text{Equação 2.5}$$

em que  $\dot{Q}_{in}$  representa o fluxo de calor que entra no volume de controlo e  $\dot{Q}_{out}$  representa esse fluxo no sentido do interior para o exterior, designando-se de perdas. Já a geração de energia no interior do volume é representado por  $\dot{Q}_{int}$  e é também considerada um ganho de calor.

A análise do comportamento térmico de um edifício permite assim prever a energia transferida entre o edifício e a sua envolvente exterior e, conseqüentemente, dimensionar sistemas de climatização que permitam suprir as necessidades térmicas essenciais à criação de condições de conforto térmico para os ocupantes. Convenciona-se que a energia auxiliar,  $\dot{Q}_{aux}$ , fornecida ao sistema (aquecimento) é positiva e a extraída do sistema (arrefecimento) é negativa, pelo que quando, em cada instante, se requer que a temperatura do ar não varie [8]:

$$\dot{Q}_{aux} = \dot{Q}_{out} - (\dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{in}) \quad \text{Equação 2.6}$$

Assim, o balanço térmico dos edifícios é traduzido em regime estacionário pela equação 2.7:

$$\dot{Q}_i + \dot{Q}_s + \dot{Q}_v + \dot{Q}_c = \rho c_p V_s \frac{\Delta T}{\Delta t} + \sum_{n=1}^k (T_i - T_e) A_n U_n \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde:

$\dot{Q}_i$  - Ganhos internos [W];

$\dot{Q}_s$  - Ganhos solares [W];

$\dot{Q}_v = \rho c_p \dot{V} (T_{ext} - T_{int})$  - Trocas de calor devido à ventilação do espaço [W];

$\dot{Q}_c = c_p \dot{V} (T_{ins} - T_{int})$  - Ganhos de climatização [W];

$\rho c_p V_s \frac{\Delta T}{\Delta t}$  - Energia armazenada no ar interior [W];

$\sum_{n=1}^k (T_i - T_e) A_n U_n$  - Transferência de calor através da envolvente [W];

E:

$\rho$  - Massa volúmica [ $\text{kg/m}^3$ ]

$T_e$  - Temperatura exterior [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$c_p$  - Calor específico [ $\text{J/kg.K}$ ]

$T_{ins}$  - Temperatura de insuflação do ar [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$V_s$  - Volume [ $\text{m}^3$ ]

$\dot{V}$  - Caudal do fluido [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\frac{\Delta T}{\delta t}$  - Variação da temperatura no tempo [ $\text{K/s}$ ]

$U_n$  - Coeficiente de transmissão térmica da superfície n [ $\text{W/m}^2.\text{K}$ ]

$T_i$  - Temperatura interior [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$A_n$  - Área da superfície n [ $\text{m}^2$ ]

Os ganhos internos de um edifício devem-se essencialmente à atividade dos ocupantes, aos equipamentos elétricos e à iluminação de cada zona térmica. Quanto aos ganhos solares, estes são consequência da incidência, direta e indireta, da radiação solar em todas superfícies não opacas do edifício. O parâmetro  $\dot{Q}_v$  representa as trocas de calor derivadas da entrada de ar resultante da ventilação e/ou infiltração do ar exterior. Quanto aos ganhos de climatização, estes são representados pela parcela do  $\dot{Q}_c$  e quantificam a energia que é necessário fornecer ao espaço interior para que se mantenha o conforto térmico. Quanto à segunda parte da equação, esta representa as perdas de energia existentes, em que  $\rho c_p V_s \frac{\Delta T}{\Delta t}$  diz respeito ao calor armazenado no ar interior e  $\sum_{n=1}^k (T_i - T_e) A_n U_n$  às perdas pela envolvente, que inclui paredes, janelas e cobertura.

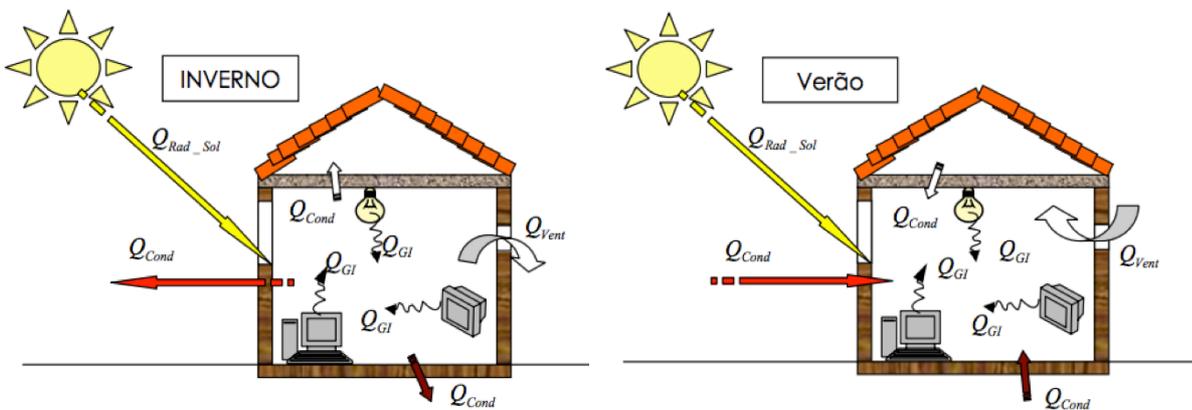


Figura 2.5 - Balanço térmico de um edifício no Inverno (esquerda) e Verão (direita) - [76]

## 2.3 Ventilação natural

A ventilação tem dois propósitos: assegurar a qualidade do ar interior e melhorar o conforto dos ocupantes. Para que o primeiro requisito seja cumprido, a qualidade do ar nos edifícios tem que ser mantida acima de um certo nível mínimo, substituindo o ar interior por ar exterior para que os níveis de CO<sub>2</sub> e oxigénio se encontrem nos níveis aconselhados e para que seja feita uma remoção de odores ou produtos de combustão durante o horário de ocupação do edifício. Assim, este tipo de ventilação é necessário em qualquer tipo de clima, uma vez que é a saúde que está em causa. Por outro lado, a ventilação para o conforto térmico é feita para refrescar o interior quando a temperatura excede a temperatura exterior [9].

É ao conjunto de processos que promovem, de forma controlada e sem recurso a qualquer dispositivo mecânico, os fluxos de ar entre o interior e o exterior, que se dá o nome de ventilação natural, solução que assegura a renovação do ar sem qualquer consumo de energia associado a ventiladores. Este fluxo de ar é promovido através da diferença de pressão entre os dois lados de qualquer abertura (frinças, janelas, portas, chaminés, ou aberturas específicas para ventilação), diferenças estas resultantes da ação do vento e do efeito térmico [10].

No primeiro caso, o vento cria diferentes pressões dependendo do seu local de incidência, o que é influenciado pela forma do edifício e pela proximidade dos edifícios adjacentes. Quanto ao efeito térmico, este tem origem na diferença de temperatura entre o ar interior e o exterior, ou entre duas zonas no interior do edifício, traduzindo-se numa diferença de densidades do ar.

O controlo da ventilação natural é feito através da abertura e fecho das aberturas (janelas, portas), sendo, no entanto, um processo difícil de controlar, uma vez que facilmente se atinge o desconforto devido a uma excessiva velocidade do ar no interior do edifício ou à diminuição da temperatura interior resultante do facto de a temperatura exterior se encontrar mais baixa. Assim, se por um lado a ventilação constitui uma parcela significativa das perdas térmicas, no período de Inverno, por outro é absolutamente necessária para assegurar caudais que garantam a qualidade do ar interior, a segurança dos utilizadores e o controlo dos riscos de condensações, sendo que no Verão, esta é considerada um ganho. [11]

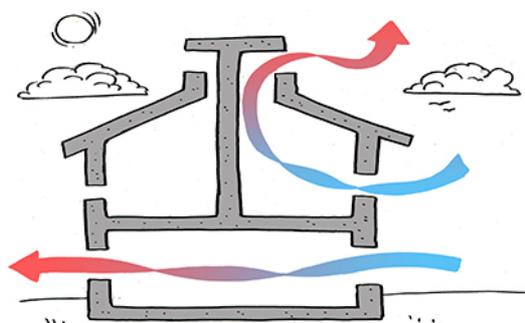


Figura 2.6 - Esquema de ventilação natural - [73]

## 2.4 Conforto térmico

É o conforto dos ocupantes de um edifício que mais está em causa quando estes são dimensionados, sendo que a utilização dos sistemas para aquecimento ou arrefecimento é feita principalmente quando existe desconforto. No entanto, o conforto térmico é uma variável difícil de se quantificar, uma vez que é altamente subjetivo. Assim, ele depende essencialmente de fatores ambientais como a temperatura velocidade do ar, da humidade, temperatura radiante (temperatura das superfícies), mas também de fatores dos ocupantes em si como o nível de atividade, nível de vestuário e até de fatores psicológicos. De acordo com o *standard 55* da ASHRAE [12], o conforto térmico é definido como “ a condição da mente que expressa satisfação com o seu ambiente térmico”, também conhecido como conforto humano, uma vez que o conforto térmico atinge-se quando os ocupantes estão satisfeitos com as condições térmicas da envolvente. Normalmente o desconforto térmico acontece devido a assimetrias térmicas radiativas, a diferenças de temperatura verticais, a uma excessiva velocidade do ar ou a uma humidade relativa inadequada. Este standard também afirma que o conforto térmico ocorre quando o esforço fisiológico de regulação é minimizado e propõe duas metodologias para o avaliar: uma baseada no estudo de Fanger, referido como PMV (Predicted Mean Vote), que pode ser utilizado para todos os edifícios, e outra que se baseia em modelos adaptativos, que é geralmente utilizado em edifícios naturalmente ventilados. O primeiro modelo refere-se a uma escala de sensibilidade térmica conforme a tabela 2.1 baseada em dados originais retirados de um elevado número de pessoas sujeitas a diferentes condições dentro de uma câmara climática, considerando que o ocupante está em conforto quando o balanço entre as suas perdas térmicas e a sua taxa metabólica é nulo. O modelo para edifícios naturalmente ventilados baseia-se em modelos adaptativos que determinam a aceitação das condições interiores com base nas temperaturas médias exteriores e a temperatura interior operativa (média entre a temperatura radiativa de um espaço e a temperatura do ar nesse espaço), tendo mais em consideração o comportamento humano. Assim, eles assumem que, se existirem variações no ambiente que causem desconforto e não houver um sistema de condicionamento de ar, os ocupantes adaptam-se às condições e tentam recuperar esse conforto através da diminuição do número de peças de roupa, da diminuição do nível de atividade ou mesmo através da abertura de janelas. A figura 2.7 traduz a gama de temperatura operativa do interior admissível para as zonas tendo em conta a temperatura média mensal exterior [13].

Tabela 2.1 - Valores de PMV (escala de sensibilidade térmica)

+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Ligeiramente quente
0	Neutro
-1	Ligeiramente fresco
-2	Fresco
-3	Frio

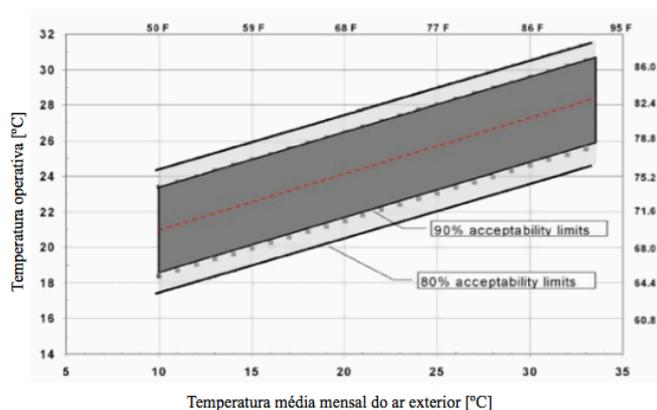


Figura 2.7 - Intervalos de aceitação de temperaturas operativas de acordo com o standard 55-2010 da ASHRAE – adaptado de [74]

## **Capítulo 3. Métodos de análise energética**

Neste capítulo serão abordados os métodos que foram utilizados nesta dissertação para o estudo do comportamento térmico de edifícios, nomeadamente para o cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento. Estes podem ser divididos em dois grupos: métodos quase-estacionários, que se baseiam num logo período de tempo para realizar o balanço energético, como por exemplo um mês (método mensal) ou uma estação inteira (método sazonal), tendo por base a regulamentação térmica, REH (Regulamento de Desempenho Energética dos Edifícios de Habitação); métodos dinâmicos, que fazem o balanço de energia numa base de tempo horária através de um software apropriado, como por exemplo o EnergyPlus. De seguida serão abordados ambos os métodos mais detalhadamente.

### **3.1 Método quase-estacionário**

O REH “define os requisitos para os edifícios de habitação, novos ou sujeitos a intervenções, bem como os parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético, em condições nominais, de todos os edifícios de habitação e dos seus sistemas técnicos, no sentido de promover a melhoria do respetivo comportamento térmico, a eficiência dos seus sistemas técnicos e a minimização do risco de ocorrência de condensações superficiais nos elementos da envolvente” [14]. Este método analisa o balanço total de ganhos e perdas de um edifício com o objetivo de o manter a uma determinada temperatura interior de referência na estação de aquecimento e arrefecimento (método quase-estacionário). Assim, o REH é utilizado para a determinação das necessidades energéticas e da classificação energética de um edifício, sendo necessário por isso fazer uma caracterização completa e detalhada do edifício como o seu local, elementos construtivos, sistemas energéticos, entre outros. No entanto, sendo este um método sazonal, essas necessidades são determinadas separadamente para as estações de aquecimento e arrefecimento e também para o aquecimento de AQS.

Para o método quase-estacionário, os resultados são obtidos através de uma ferramenta de cálculo desenvolvida e disponibilizada pelo instituto IteCons (Anexo 1 e Anexo 2), onde são também colocados todos os dados de input necessários para realizar os cálculos de análise energética, sendo que a versão utilizada (2016) já tem em conta as últimas alterações legislativas, incorporando também a folha de cálculo Excel fornecida pelo LNEC “Ventilação REH e RECS” que é citada no despacho 15793-K/2913 do REH. Assim, é necessário colocar na ferramenta dados relativos a todas as características da habitação (áreas, soluções construtivas da envolvente opaca e envidraçada, características dos envidraçados exteriores, pontes térmicas lineares, sistema de ventilação, sistemas técnicos, etc) e relativos ao clima em questão (zona climática de Inverno e Verão, número de GD, temperatura média exterior nas duas estações, etc). Quanto à classificação da inércia térmica, esta é também feita na folha de cálculo, sendo necessário colocar informação sobre os elementos construtivos da habitação (área, massa total e fator corretivo). Uma vez que um dos objetivos desta dissertação é o de estudar o comportamento térmico de uma habitação, apenas têm interesse os índices energéticos associados às necessidades de aquecimento e arrefecimento, abordadas de seguida.

### 3.1.1 Necessidades energéticas

Pelo facto de, por vezes, existirem condições adversas no exterior, existe a necessidade de aquecer (e humidificar) ou arrefecer (e desumidificar) o ar interior de modo a manter as condições de conforto desejadas. No entanto, essas necessidades de energia são fortemente dependentes de vários fatores como a atividade dos ocupantes dentro do edifício, do tipo e quantidade de equipamentos elétricos e iluminação, e também do limite de conforto que se impõe. Assim, de forma a generalizar todos esses fatores, são definidos no regulamento limites como:

- 4 W/m<sup>2</sup> de ganhos internos constantes ao longo do ano
- 18°C para temperatura de referência na estação de aquecimento
- 25°C para temperatura de referência na estação de arrefecimento

#### 3.1.1.1 Estação de aquecimento

A estação de aquecimento corresponde à altura do ano em que é necessário aquecer o interior de um edifício, tendo uma duração variável que depende da localização e, conseqüentemente, do clima durante o Inverno. Para simplificação de cálculo, considera-se o edifício (ou fração autónoma) como uma única zona mantida permanentemente à temperatura de referência (18°C). Na estação de aquecimento é necessário suprir as perdas de calor existentes para o exterior através da envolvente opaca, das infiltrações e dos envidraçados. Assim, é feito um balanço entre essas perdas e os ganhos térmicos associados à radiação solar incidente nos envidraçados juntamente com os ganhos internos do edifício (ocupação, iluminação e equipamentos elétricos). Segundo o REH, as necessidades nominais de energia útil para o aquecimento do edifício,  $N_{ic}$  [kWh/m<sup>2</sup>.ano] são calculadas através da seguinte equação [14] :

$$N_{ic} = (Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i})/A_p \quad \text{Equação 3.1}$$

Em que:

$Q_{tr,i}$  corresponde à transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento através da envolvente dos edifícios [kWh] e é calculada através da expressão:

$$Q_{tr,i} = 0,024 \times GD \times H_{tr,i} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

GD corresponde ao número de graus dias e  $H_{tr,i}$  ao coeficiente global de transferência de calor por condução na estação de Inverno;

$Q_{ve,i}$  corresponde à transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento, [kWh] e é calculada através da expressão:

$$Q_{ve,i} = 0,024 \times GD \times H_{ve,i} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

$H_{ve,i}$  é o coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento;

$Q_{gu,i}$  corresponde aos ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento resultantes dos ganhos solares através dos envidraçados, da iluminação, dos equipamentos e dos ocupantes, [kWh], obtidos através da expressão seguinte:

$$Q_{gu,i} = \eta_i \times Q_{g,i} \quad \text{Equação 3.4}$$

onde  $\eta_i$  corresponde ao fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento e  $Q_{g,i}$  diz respeito aos ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento, que por sua vez são calculados através de:

$$Q_{g,i} = Q_{int} + Q_{sol} \quad \text{Equação 3.5}$$

onde  $Q_{int}$  são os ganhos térmicos associados a fontes internas de calor, na estação de aquecimento e  $Q_{sol}$  os ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos envidraçados, na estação de aquecimento, calculados da seguinte forma:

$$Q_{sol} = G_{sul} \sum_j [X_j \sum_n F_{s,i} A_{s,i_nj}] \times M \quad \text{Equação 3.6}$$

onde:

$G_{sul}$  corresponde ao valor médio mensal da energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a Sul, durante a estação de aquecimento, por unidade de superfície [kWh/m<sup>2</sup>.mês];

$X_j$  o fator de orientação para as diferentes exposições;

$A_{s,i_nj}$  a área efetiva coletora de radiação do vão envidraçado na superfície n com a orientação j, [m<sup>2</sup>];

$F_{s,i}$  o fator de obstrução do vão envidraçado;

M a duração média da estação convencional de aquecimento;

$A_p$  corresponde à área interior útil de pavimento do edifício medida pelo interior [m<sup>2</sup>].

### 3.1.1.2 Estação de arrefecimento

A estação de arrefecimento corresponde à altura do ano em que é necessário arrefecer o interior de um edifício para que este se mantenha à temperatura de referência de 25°C, cuja duração de referência no regulamento é de 2928 horas. Nesta altura, a temperatura exterior tende a ser mais elevada que a do interior do edifício, pelo que se verifica a transmissão de calor do exterior para interior através da envolvente e devido à renovação do ar interior, embora que seja por curtos períodos, pelo que se consideram como perdas. Quanto aos ganhos, estes devem-se às fontes internas de calor (ocupação, equipamentos elétricos e iluminação) e aos ganhos térmicos associados à radiação solar incidente no envolvente exterior opaca e envidraçada. Assim, a energia necessária para o arrefecimento do edifício, denomina-se de necessidades nominais de energia útil para arrefecimento,  $N_{vc}$  [kWh/m<sup>2</sup>.ano], que é representada pela equação 3.7 [14]:

$$N_{vc} = (1 - \eta_v)Q_{g,v}/A_p \quad \text{Equação 3.7}$$

Em que:

$\eta_v$  corresponde ao fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento que é calculado

$Q_{g,v}$  corresponde aos ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento, sendo a soma dos ganhos térmicos associados a fontes internas de calor ( $Q_{int,v}$ ) com os ganhos térmicos associados à radiação solar incidente na envolvente exterior opaca e envidraçados ( $Q_{sol,v}$ ), calculados através da expressão:

$$Q_{sol,v} = \sum_j [I_{sol,j} \times \sum_n F_{s,vnj} \times A_{s,vnj}] \quad \text{Equação 3.8}$$

onde:

$I_{sol,j}$  corresponde à energia solar média incidente numa superfície com orientação j durante toda a estação de arrefecimento [kWh/m<sup>2</sup>];

$F_{s,vnj}$  fator de obstrução da superfície do elemento n, com a orientação j;

$A_{s,vnj}$  à área efetiva coletora de radiação solar da superfície do elemento n com a orientação j

$A_p$  corresponde à área interior útil de pavimento do edifício, medida pelo interior, [m<sup>2</sup>].

As perdas de calor pela envolvente durante toda a estação de arrefecimento, devidas à diferença de temperatura entre o interior e o exterior do edifício, são calculadas pela expressão seguinte:

$$Q_{tr,v} = H_{tr,v} \times (\theta_{ref,v} - \theta_{ext,v}) \times L_v / 1000 \quad \text{Equação 3.9}$$

em que:

$H_{tr,v}$  corresponde ao coeficiente global de transferência de calor por condução através de toda a superfície dos elementos da envolvente na estação de Verão (W/°C);

$\theta_{ref,v}$  diz respeito à temperatura de referência na estação de arrefecimento (25°C);

$\theta_{ext,v}$  temperatura média do ar exterior para a estação de arrefecimento [°C];

$L_v$  a duração da estação de arrefecimento (2928 horas).

Quanto à transferência de calor por ação da renovação do ar interior,  $Q_{ve,v}$ , é calculada de acordo com a equação:

$$Q_{ve,v} = H_{ve,v} \times (\theta_{ref,v} - \theta_{ext,v}) \times L_v / 1000 \quad \text{Equação 3.10}$$

onde  $H_{ve,v} = 0,34 \times R_{ph,v} \times A_p \times P_d \quad [kWh]$

Em que:

$R_{ph,v}$  Taxa nominal de renovação do ar interior na estação de arrefecimento;

$A_p$  Área interior útil de pavimento, medida pelo interior, [m<sup>2</sup>];

$P_d$  pé direito médio da fração, [m].

### 3.1.1.3 Fator de utilização de ganhos

Tanto na estação de aquecimento como na de arrefecimento, os respetivos fatores de utilização dos ganhos térmicos  $\eta_i$  e  $\eta_c$  calculam-se de acordo com as seguintes equações [14]:

$$\eta = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}}, \text{ se } \gamma \neq 1 \text{ e } \gamma > 0 \\ \frac{a}{a + 1} & \text{ se } \gamma = 1 \\ \frac{1}{\gamma} & \text{ se } \gamma < 0 \end{array} \right\} \quad \text{Equação 3.11}$$

em que:

$$\gamma = \frac{Q_g}{Q_{tr} + Q_{ve}} \quad \text{Equação 3.12}$$

com:

$Q_{tr}$  - Transferência de calor por transmissão através da envolvente do edifício, na estação em estudo [kWh];

$Q_{ve}$  - Transferência de calor por ventilação na estação em estudo [kWh];

$Q_g$  - Ganhos térmicos brutos na estação em estudo [kWh];

a - parâmetro que traduz a influência da classe de inércia térmica.

## 3.2 EnergyPlus

Devido a um aumento da preocupação com o consumo de energia no sector dos edifícios, é cada vez mais recorrente a utilização de programas de simulação térmica dinâmica para determinar as necessidades de energia de um determinado edifício num período temporal definido pelo utilizador. Devido à possibilidade de variar todo o tipo de características de um edifício como a sua arquitetura, soluções construtivas, orientação geográfica assim como os padrões de iluminação, ocupação e equipamentos, este tipo de programas torna-se numa ferramenta muito útil na fase de projeto de um edifício, uma vez que permite testar várias soluções para uma melhoria da eficiência energética antes deste ser construído.

Com o objetivo de simular a habitação em estudo nesta dissertação, foi utilizado o software de simulação dinâmica EnergyPlus versão 8.4.

EnergyPlus é um programa de análise energética e simulação dinâmica de cargas térmicas que, tendo como base os inputs definidos pelo utilizador, calcula diversos parâmetros, como sejam as necessidades de aquecimento e/ou arrefecimento para manter determinadas condições de conforto interiores, temperaturas do ar das zonas térmicas definidas, caudais de infiltração e de ventilação, ganhos solares e ganhos internos.

Este software foi distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e desenvolvido a partir dos programas BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2, ambos desenvolvidos como ferramentas de simulação energética de edifícios e lançados no final dos anos 70 e princípios dos anos 80 devido à crise energética e ao reconhecimento de que o consumo por parte do sector dos edifícios era bastante significativo. No entanto, estes programas apresentavam alguns problemas de interação entre variáveis, como os sistemas de AVAC. Assim, o EnergyPlus foi desenvolvido com o objetivo de eliminar estas dificuldades e limitações, apresentando uma organização mais simples e acessível, tendo como público alvo arquitetos e engenheiros que desejassem dimensionar sistemas de AVAC apropriados, desenvolver estudos sobre custos de ciclo de vida, otimizar a utilização da energia, entre outros. Por se tratar de um programa “open-source”, o seu código está disponível e passível de ser melhorado por parte de utilizadores independentes [15]. Primeiramente é necessário criar o modelo do edifício em 3D e, uma vez que este software não possui uma interface gráfica, foi necessário recorrer a um software desenvolvido pela Trimble, o Google Sketchup, cujo plug-in Legacy OpenStudio permite exportar a geometria desenhada para o EnergyPlus (OpenStudio 2015). De seguida é necessário inserir um ficheiro climático da zona onde o edifício se encontra de forma a serem definidas as condições climáticas. Por fim, são definidas as principais características do edifício como as suas soluções construtivas, padrões de ocupação, iluminação e equipamentos elétricos, níveis de infiltração, ventilação natural e/ou mecânica, sombreamentos, entre outros.

A versão do EnergyPlus utilizada neste trabalho é a 8.4. e esta ferramenta de simulação é, atualmente, das mais utilizadas pois tem a grande vantagem de fazer simulações em intervalos de tempo definidos pelo utilizador e apresentar outputs com frequências inferiores a uma hora (até 15 minutos).

De forma a simplificar o cálculo, o programa assume que a massa de ar de cada zona térmica está perfeitamente misturada e apresenta uma temperatura uniforme em toda a zona, não tendo por isso em conta as diferenças de temperaturas sentidas, por exemplo, mais próximo de uma janela ou porta. A simulação é iniciada pelo módulo de simulação do balanço energético, onde são calculadas as condições de todas as zonas térmicas. Posteriormente, estes resultados são utilizados como input para o cálculo das cargas de aquecimento e arrefecimento de acordo com o timestep definido pelo utilizador, sendo que estes mesmos resultados são novamente utilizados para atualizar as condições térmicas de cada zona (figura 4.1).

Assim, a equação 4.11 mostra como o EnergyPlus efetua o cálculo do balanço térmico, a cada passo de tempo, para uma zona térmica z:

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

Equação 3.13

Onde:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  – Energia armazenada no ar [W];

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  – Ganhos internos convectivos [W];

$\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  – Transferência de calor convectivo pela envolvente [W];

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$  – Transferência de calor por mistura de ar entre zonas [W];

$\dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_s)$  – Transferência de calor por infiltração [W];

$\dot{Q}_{sis}$  – Carga térmica do sistema AVAC [W].

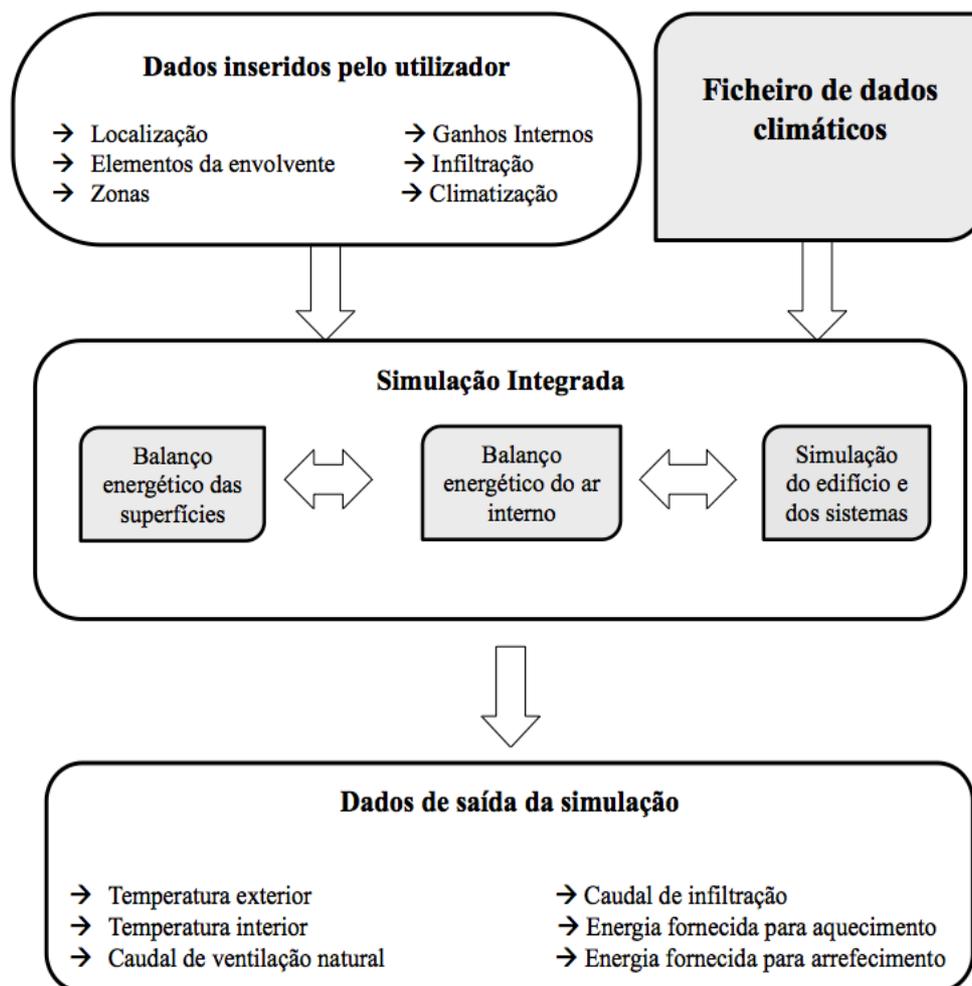


Figura 3.1 - Etapas de simulação em EnergyPlus – adaptado de [79]

## Capítulo 4. Caso de estudo

### 4.1 Análise do local e climática

O edifício em estudo localiza-se no concelho de Sintra, mais especificamente em Godigana-Terrugem, a cerca de 165m de altitude. De acordo com Despacho nº 15793-F/2013 do Decreto-Lei nº 118/2013, o local pertence à região NUTS III (Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos) e zona climática de Inverno II. O clima do Concelho é de forma geral ameno, com Invernos chuvosos e Verões secos. Contudo, a região é também conhecida por exibir microclimas variados. Quando os ventos sopram do quadrante Norte, aliás dominante, a barreira orográfica marcada que constitui a Serra de Sintra força o ar para cima, originando condensação - nebulosidade e nevoeiros - e muitas vezes, precipitação, em particular na vertente Norte. Esta condensação localizada ocorre mesmo na estação de Verão. Por outro lado, a maior altitude da Serra é suficiente para intersectar a base da camada de nuvens, de forma que mesmo quando a condensação orográfica localizada não ocorre, as zonas mais altas ficam muitas vezes imersas em nevoeiro [16].

Para obter o ficheiro climático do local, foi utilizada a folha de cálculo do LNEG “Anos meteorológicos de referência para simulação dinâmica”, que se encontra no Anexo 6. Para conhecer um pouco melhor o clima desta região, foi estudado qual o perfil da temperatura de bolbo seco, da radiação direta e da radiação difusa ao longo do ano.

A figura 4.1 tem representadas as temperaturas máximas e mínimas de cada dia ao longo de um ano. Pode-se observar que a temperatura é, como seria de esperar para o clima de Portugal, mais elevada nos meses entre Maio e Setembro, não ultrapassando, no entanto, os 31°C, uma vez que se trata de um clima ameno. No Inverno a temperatura chega a atingir os 3°C, apesar da temperatura média ser de 16°C. Quanto às amplitudes térmicas diárias, a mais baixa registada não chega a 1°C (Fevereiro), por outro lado a mais elevada é de 17°C (Agosto). Observando a figura 4.2, pode-se concluir que a temperatura se situa, na maior parte do tempo (51%) entre 10°C e 18°C. Destaque para a gama de temperaturas entre os 20 e 25°C que ocorre em 18% do ano e que contribui positivamente para a possibilidade de a obtenção de conforto térmico sem necessidade de recurso a sistema de climatização.

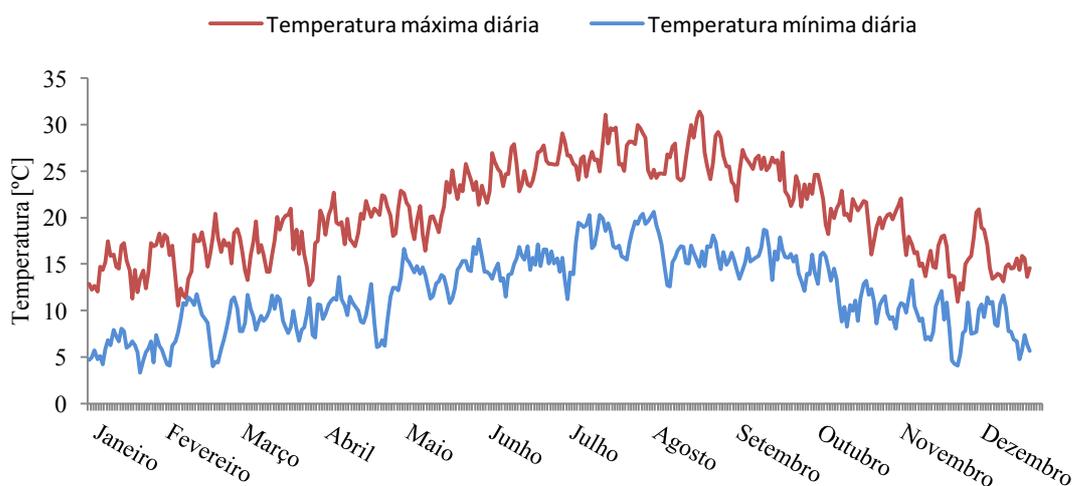


Figura 4.1 - Perfil de temperatura exterior máxima e mínima (média diária)

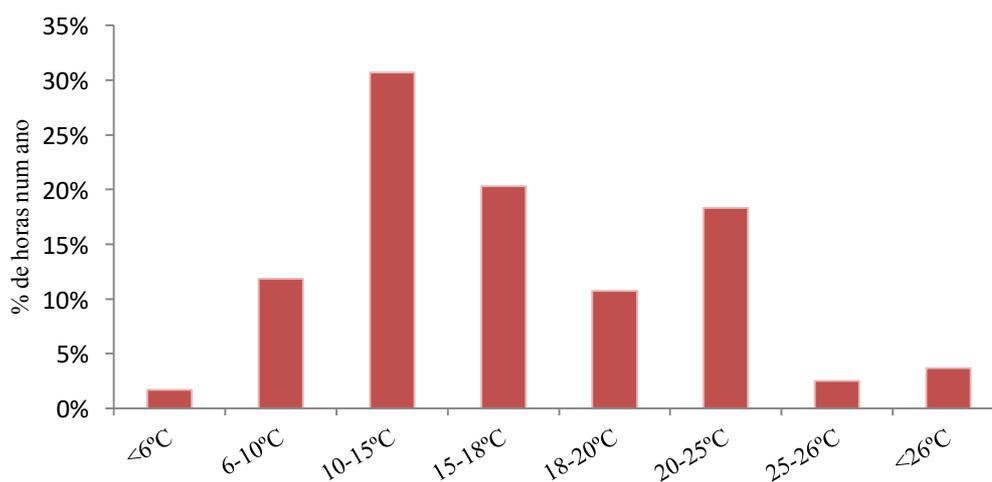


Figura 4.2 - Frequência anual de ocorrência de temperaturas

Tal como a temperatura exterior, o tipo de radiação solar a que o edifício vai estar sujeito (radiação direta ou radiação difusa) e, conseqüentemente, a percentagem de nebulosidade que o determina, também é uma variável extremamente relevante que influencia diretamente o desempenho energético dos edifícios. Tendencialmente num dia sem nebulosidade, a componente direta da radiação solar é a mais significativa para o aumento dos ganhos solares. No entanto em dias nublados, também a radiação difusa e a refletida por outras superfícies são importantes para o aumento desses ganhos.

Assim, a radiação solar afeta o conforto térmico dos ocupantes uma vez que no Inverno é um ganho de calor que pode ser aproveitado para aquecer os espaços e no Verão normalmente faz com que a temperatura interna aumente, sendo por isso necessário ser controlada através de sombreamentos nas janelas, proteções solares (como toldos e telheiros) ou sistemas de arrefecimento (passivos ou ativos). A figura 4.3 representa a média diária mensal da radiação solar direta e difusa no concelho de Sintra, tendo o seu pico no mês de Julho e o seu valor mínimo no mês de Dezembro.

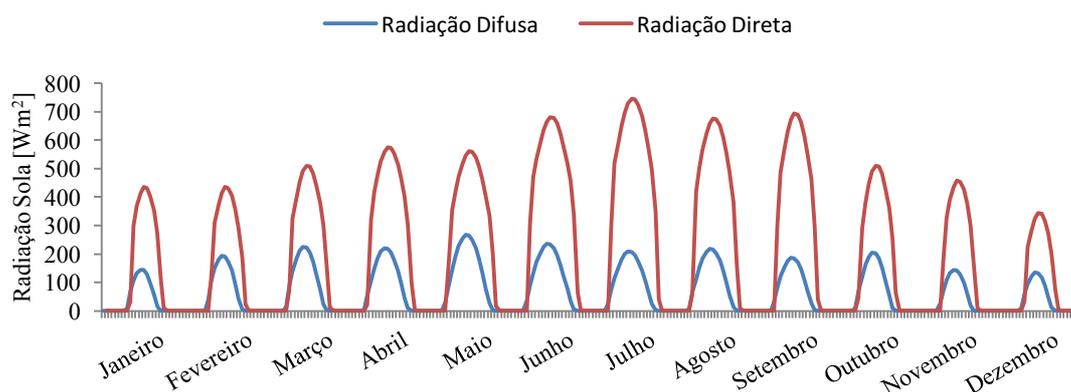


Figura 4.3 – Radiação solar incidente (média mensal diária)

## 4.2 Descrição do edifício

O edifício em estudo é uma moradia unifamiliar de dois andares, ainda em fase de projeto, assente num lote de terreno de cerca de 4060m<sup>2</sup>. É uma habitação com uma área útil de 149m<sup>2</sup> dividida entre o R/C (73,57m<sup>2</sup>) e o 1º andar (74,43m<sup>2</sup>). As principais áreas encontram-se na tabela 5.1.

Tabela 4.1 - Principais áreas do projeto em estudo

Área de implantação	98,60 m <sup>2</sup>
Área bruta de construção R/C	180,58 m <sup>2</sup>
Área bruta de construção 1º piso	98,60 m <sup>2</sup>
Área útil R/C	73,57 m <sup>2</sup>
Área útil 1º piso	74,43 m <sup>2</sup>
Área habitável R/C	68,99 m <sup>2</sup>
Área habitável 1º piso	71,16 m <sup>2</sup>
Volumetria habitação	950,05 m <sup>3</sup>



Figura 4.4 - Vista frontal da habitação

O rés do chão é composto pelo hall de entrada (4,6m<sup>2</sup>), por uma casa de banho (2,35 m<sup>2</sup>), por uma zona de arrumos debaixo da escadaria (3,35 m<sup>2</sup>), pela cozinha (14,20 m<sup>2</sup>) e pela sala (47,70 m<sup>2</sup>). Uma vez que a divisão entre a sala e a cozinha se faz através de uma porta que tem a possibilidade de estar totalmente recolhida, existe a possibilidade da união entre as duas zonas.

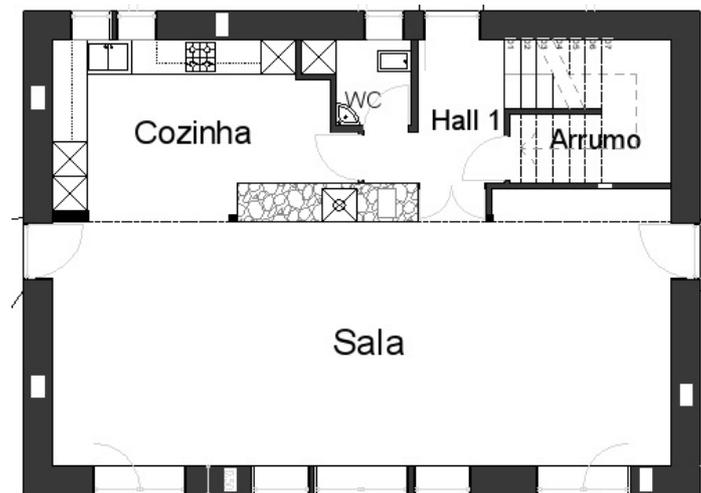


Figura 4.5 - Planta do piso térreo da habitação

No piso de cima encontra-se o segundo hall (13,50 m<sup>2</sup>) os três quartos da habitação (em que dois têm uma área de 15 m<sup>2</sup> e o terceiro de 13,95 m<sup>2</sup>) e uma segunda casa de banho (8,80 m<sup>2</sup>) com uma zona técnica (1m<sup>2</sup>) para colocação do cilindro do sistema solar térmico para aquecimento de águas sanitárias.

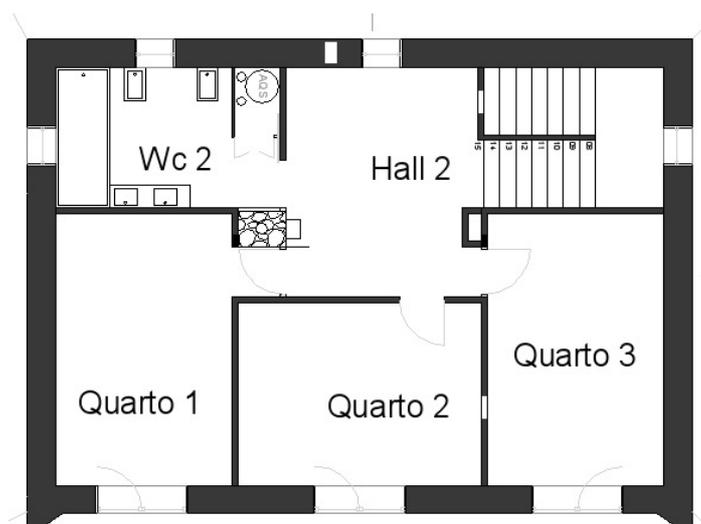


Figura 4.6 - Planta do primeiro piso da habitação

### 4.3 Orientação e envidraçados

Em termos de orientação, sempre que o loteamento o permita, e para se conseguir uma maior superfície exposta à radiação solar direta, a face de um edifício orientada a Sul deve ser sempre mais longa que as orientadas a nascente e poente [17]. Num clima como o de Portugal, é a esta orientação que mais otimiza os ganhos solares ao longo de todo o ano. Uma vez que os ângulos de incidência de radiação são diferentes no Inverno e no Verão, a orientação a Sul permite beneficiar tanto uma estação como outra. Assim, no Inverno, uma vez que os o percurso do sol se efetua para azimutes muito próximos do Sul geográfico, os raios solares conseguem penetrar através dos vãos envidraçados, contribuindo para o aquecimento dos espaços interiores. Por outro lado, uma vez que no Verão o percurso do Sol é mais próximo do zénite, apresenta um ângulo de incidência com a normal de valor mais elevado, o que, combinado com um adequado sombreamento solar, não permite que os raios atravessem os vãos, impedindo assim o aumento da temperatura interior [18]. Assim, tanto a sala como os três quartos são orientados a Sul, uma vez que se deve privilegiar esta orientação para as zonas onde as pessoas normalmente passam mais tempo numa habitação familiar.

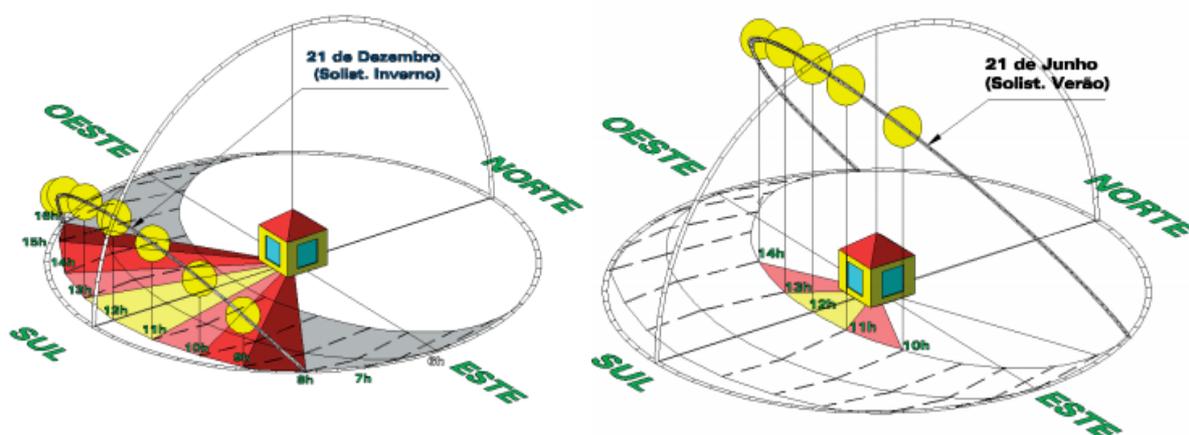


Figura 4.7 - Incidência da radiação solar no inverno (esquerda) e verão (direita) - [18]

Quanto à cozinha e casas de banho, estas estão viradas a Norte, sendo esta a fachada menos problemática num edifício em termos de radiação solar e a mais fria, uma vez que no Inverno não recebe nenhuma radiação direta (apenas alguma difusa a partir da abóbada celeste) e no Verão recebe uma pequena quantidade de direta no período da manhã e final de tarde. Desta forma, à partida será uma boa solução uma vez que existirão grandes quantidades de ganhos internos consequentes dos equipamentos elétricos da cozinha.

Quanto aos envidraçados, a maior área de vãos será na parte Sul da habitação como mostra a figura 4.8 de modo a promover o aumento dos ganhos solares no Inverno, sendo que será necessário existir sombreamento de forma a evitar o sobreaquecimento no Verão, como será abordado mais à frente.

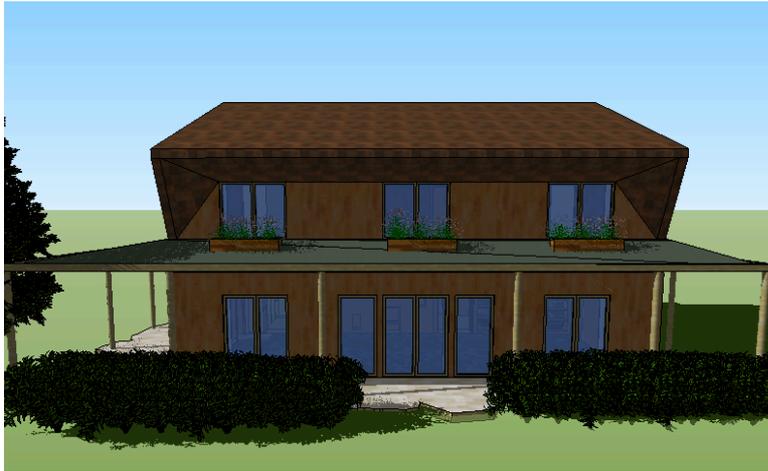


Figura 4.8 - Fachada Sul da habitação



Figura 4.9 - Perspetiva da habitação

Quanto à forma de um edifício, esta é um fator com uma grande influência nas suas perdas térmicas, independentemente de um bom posicionamento no terreno ou de uma alta resistência à transmissão térmica total. Assim, quanto mais compacta for a forma de um edifício, com poucas saliências e reentrâncias e uma reduzida superfície exterior, mais reduzidas serão as perdas de calor e melhor será o seu balanço térmico global [17]. Através das figuras 4.8 e 4.9 pode-se observar que o edifício em estudo tem uma forma que faz com que esteja menos vulnerável às diferenças de temperatura exteriores, mas mais vulnerável às cargas internas, potencializando assim a redução de perdas de calor.

#### 4.4 Proteções solares e vegetação

Uma vez que a habitação em estudo dispõe de grandes superfícies envidraçadas, principalmente na fachada Sul, a utilização de sombreadores torna-se particularmente útil, permitindo controlar não só a intensidade luminosa como impedir o excesso de radiação solar no seu interior. Dado que os

dispositivos de sombreamento interiores podem contribuir para um aquecimento suplementar do ambiente por aquecimento do próprio dispositivo devido à sua absorção solar, os colocados fora do edifício são mais recomendáveis. Assim, no que toca ao sombreamento interior, este será feito através de cortinas opacas de cor clara pelo interior das janelas exteriores, permitindo assim um controlo no que toca à entrada de ganhos solares e uma maior privacidade, ao mesmo tempo que possibilita uma pequena entrada de luminosidade natural. Quanto ao sombreamento exterior, será construído um telheiro à volta de toda a habitação que irá sombrear todas as divisões do rés-do-chão, perfazendo um ângulo de 45° em relação ao meio dos envidraçados. O andar de cima (os três quartos a Sul) será parcialmente sombreado na parte Sul através de uma extensão do telhado como mostra a figura 4.10.

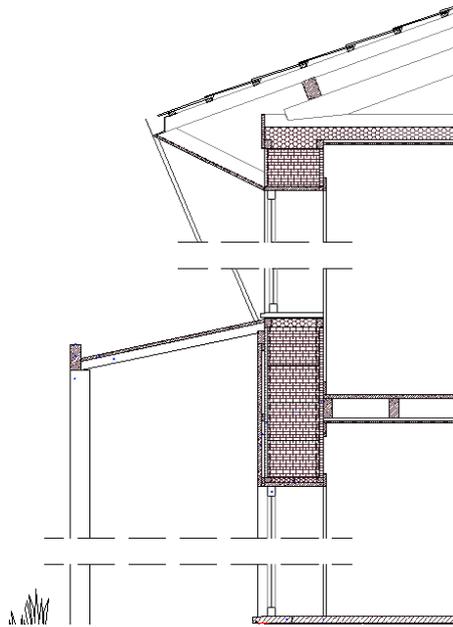


Figura 4.10 - Corte lateral da habitação - vista do telheiro e extensão do telhado

No entanto, este tipo de sombreamento, os chamados sombreadores fixos exteriores (salientes das fachadas, constituídos por plataformas ou prolongamentos do telhado), apesar de bastante frequentes, não são por vezes muito aconselháveis, pois, mesmo quando devidamente dimensionados por forma a permitir a radiação solar direta no inverno, podem constituir um indesejável obstáculo à radiação solar difusa na estação fria do ano [17].

A vegetação, infelizmente tão desprezada por muitos, é um elemento de extrema importância na regularização e equilíbrio das condições climáticas extremas, podendo ser considerada um elemento de sombreamento. Assim, tem que se ter em conta não só as características, espécie de vegetação ao tipo e densidade da sua folha, como o posicionamento no terreno. Desta forma, a vegetação de folhagem persistente e muito densa, de pequeno ou grande porte, é mais apropriada para a construção de barreiras protetoras dos ventos dominantes. Por outro lado, a vegetação de folha caduca representa um bom contributo natural à regulação periódica anual da quantidade de radiação solar nas fachadas, que se pretende que seja elevada no inverno e nula no verão [17]. Neste projeto a vegetação não será tida em conta, mas uma vez que não se sabe ao certo qual o tipo e quantidade que se irá utilizar, esta foi desprezada durante a análise do comportamento térmico da habitação.

## 4.5 Materiais utilizados

Um dos objetivos do projetista desta habitação é o de trabalhar com materiais naturais, aqueles que no passado, tradicionalmente já eram utilizados na construção, como a terra, os solos argilosos, a palha, as madeiras, as cortiças, as pedras, etc. Todos estes materiais, para além de serem abundantes e biodegradáveis, têm reduzida energia associada na sua fase de produção, de preferência que estejam disponíveis localmente para não serem transportados de grandes distâncias. Neste subcapítulo serão descritos os materiais mais utilizados na habitação em estudo, nomeadamente os utilizados na fachada, cobertura e como isolamentos térmicos.

O revestimento de uma fachada, qualquer que ele seja, influencia as condições de habitabilidade e de salubridade dos edifícios em geral. Das exigências funcionais espera-se que o material de revestimento proteja a fachada das ações dos diversos agentes agressivos como a água, choques, produtos químicos presentes no ar, poeiras, resistindo o próprio revestimento a esses agentes e contribuindo para uma estanqueidade à água, conferindo à fachada características aceitáveis de planaridade, verticalidade e regularidade superficial [19]. Assim, tanto o telhado como a fachada exterior do primeiro piso (excluindo a fachada dos três quartos) serão revestidos por telha cerâmica Plasma CS. Quanto à fachada do rés-do-chão e da parte sul do primeiro piso, esta será revestida por ThermoWood, um tipo de madeira tratada através de um processo que será explicado posteriormente. De forma a permitir a eliminação das pontes térmicas, a evitar condensações internas e facilitar a dissipação da temperatura, toda a fachada exterior será ventilada. Quanto ao isolamento térmico, este é determinante para minimizar as trocas térmicas excessivas entre o interior e o exterior, evitando perdas de calor no Inverno e sobreaquecimento interior no Verão. O material de isolamento deve apresentar um baixo coeficiente de transmissão térmica (U-value) e uma reduzida energia incorporada. Assim, no edifício serão utilizados como isolamento fardos de palha, cortiça, aglomerado negro de cortiça e granulado de cortiça.

### 4.5.1 Telha para revestimento

A telha cerâmica foi um dos primeiros materiais de construção a ser fabricado pelo homem e constitui ainda hoje uma das soluções mais eficientes para capeamento das coberturas ou revestimento de fachadas, pelo reconhecimento do mérito em matéria de durabilidade, elevada resistência, e com um final de vida útil de fácil resolução e não agressivo para o meio ambiente. Assim, este tipo de telha contribui para uma construção mais sustentável, aumentando a eficiência energética das habitações e diminuindo, por isso, as cargas de aquecimento e arrefecimento. Quando aplicada de forma correta, a telha constitui uma cobertura ventilada, que aliado ao sombreamento proporcionado e à renovação do ar existente entre a telha e a cobertura, proporciona um menor aquecimento no Verão e uma rápida dissipação da humidade no Inverno. Para além disso, a densidade das telhas cerâmicas reduz a transmissão dos ruídos exteriores para o interior das habitações [19]. Quanto ao seu desempenho face aos agentes climáticos, estas telhas comportam-se como uma membrana porosa que não permite a entrada de água, mas assegura as trocas de humidade com o exterior. Assim, parte da fachada da habitação será revestida com telha cerâmica Plasma CS, uma vez que este tipo de telha tem um design inovador que traz um novo paradigma sobre o conceito de revestimento cerâmico integral, permitindo

uma total continuidade de aspeto e cor do revestimento do edifício, sem necessidade de introduzir materiais diferentes [19].

#### 4.5.2 Madeira

Uma vez que um dos objetivos do projetista é utilizar materiais naturais locais pouco processados ou com pouca energia incorporada e que ao mesmo tempo garantam uma elevada eficiência energética, a madeira foi um dos materiais escolhidos mais utilizado. Esta escolha deveu-se ao facto da madeira ter uma maior durabilidade e necessitar de uma menor manutenção quando protegida dos agentes externos (neste caso debaixo do telheiro e da extensão do telhado).

A madeira, devido às suas características e também grande abundância, tem sido um material desde sempre utilizado pelo Homem com inúmeras aplicações, desde estruturais a decorativas, passando até pela construção de aviões. Esta realidade deve-se principalmente ao facto de ser um material ambientalmente sustentável, ou seja, comparativamente com os outros principais materiais de construção (betão, aço, tijolo, alumínio), a madeira é o único de origem natural, reciclável, renovável e biodegradável, para além de que é dos produtos que depende de uma menor energia nos seus processos de transformação. Para além disso, é também facilmente trabalhável e apresenta boas características mecânicas, físicas e químicas para um grande leque de utilizações [20].

Assim, destaca-se a elevada resistência mecânica (tração e compressão) e a baixa densidade que tornam a madeira uma ótima escolha para aplicações estruturais e a possibilidade de se obter uma construção leve. Tem uma boa durabilidade e quanto ao coeficiente de transmissão térmica, a madeira tem uma gama de valores baixos, entre 0,12W/m.K e 0,23 W/m.K [17], apresentando por isso boas condições de isolamento térmico [21]. Pelo facto de apresentar inúmeras texturas cores e padrões, a madeira torna-se num material natural mais agradável visualmente e ao toque, permitindo aos projetistas uma grande variedade de escolha.

Deste modo, construir com madeira representa uma solução vantajosa justificando assim os cerca de 90% de construção habitacional em madeira em regiões desenvolvidas como a Austrália, Noruega, Suécia e Canadá [20]. Já [22] refere que a madeira, para além de ser um recurso renovável, contém uma grande quantidade de energia solar, exigindo, portanto, baixas quantidades de combustíveis fósseis para a sua manufatura (e, portanto, reduzida energia incorporada), fornecendo também uma fonte de energia independente quando a madeira residual é queimada. Assim, a utilização da madeira residual para produção de energia resulta numa reduzida utilização de combustíveis fósseis quando comparada com a reciclagem de materiais como metais e vidros.

Assim, as paredes exteriores serão compostas por ripados verticais e horizontais feitos de pinho nacional, por uma camada de OSB (aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas) e serão parcialmente revestidas com ThermoWood de pinho. Este é um tipo de madeira que é submetido a vários processos onde a madeira é aquecida a uma temperatura de pelo menos 180 graus Celsius enquanto é protegida com vapor de água. Além de fornecer proteção, o vapor de água também afeta as alterações químicas que acontecem na madeira. Como resultado deste tratamento, é criado o ThermoWood®, um produto amigo mais sustentável, mais estável do que a madeira normal em condições de mudança de humidade, e as suas propriedades de isolamento térmico são melhoradas. Se

o tratamento for efetuado a uma temperatura elevada, também torna a madeira resistente à degradação [23].

Para além da fachada, será também utilizada madeira maciça no pavimento do primeiro piso e na cobertura horizontal interior do rés-do-chão. Quanto à cobertura inclinada, esta irá possuir na sua estrutura principal asnas, uma espécie de vigas armadas em forma triangular constituídas por várias peças de madeira de pinho nacional, como ripas, varas, madres e pernas. No que toca ao telheiro exterior, todo ele será construído em madeira tratada (pilares, vigas) e OSB.

### **4.5.3 Isolamento térmico**

O tipo de isolante térmico mais utilizado em Portugal é o EPS (poliestireno extrudido moldado), mas também se usam o XPS (poliestireno extrudido expandido) e isolantes térmicos minerais como lã de rocha e lã de vidro [24]. No entanto, para fazer face à construção de uma habitação de materiais naturais, com pouca energia incorporada e com quantidades mínimas de CO<sub>2</sub> incorporado, foram estudadas e utilizadas outras soluções. Apesar de se saber que o isolamento utilizado na fachada exterior serão fardos de palha compactados, foram também estudados outros tipos fibras vegetais (fibras têxteis, fibras de côco, fibras de cânhamo, entre outros). Para as restantes soluções construtivas, serão utilizados isolamentos térmicos de cortiça natural, aglomerado de cortiça negra (expandida) e granulado de cortiça.

#### **4.5.3.1 Fibras vegetais**

Do ponto de vista ecológico, o uso de fibras vegetais é muito atrativo, uma vez que, para além de serem materiais orgânicos e renováveis, a sua matéria prima vem de áreas sem uso agrícola ou de resíduos da indústria alimentar. Durante o seu ciclo de vida, a poluição que provocam é relativamente pequena e têm uma capacidade para sequestrar carbono, ajudando ainda a regular a humidade interna. No entanto, há que ter em atenção os produtos compósitos, que devem ser analisados cuidadosamente, uma vez que a adição de componentes sintéticos como retardadores de chama e fungicidas, podem representar riscos para a saúde e ambiente [25]. Segundo [26], atualmente, estão a ser realizados cada vez mais estudos no sentido de aproveitar as propriedades desta matéria prima, utilizando-as como isolamento térmico na forma de enchimento solto, placas ou mantas (cânhamo, celulose, madeira, cevada, entre outros). Para além de terem uma baixa condutividade térmica, quando comparado com isolamentos de materiais artificiais, as fibras vegetais apresentam uma menor percentagem de energia incorporada e toxicidade.

#### **4.5.3.2 Fardos de Palha**

A palha é um material renovável que oferece boas propriedades de isolamento térmico e um impacto ambiental muito menor em comparação com outros materiais de construção correntes. Na construção, a palha pode ser utilizada solta, mas a maioria dos sistemas desenvolvidos utilizam-na em fardos, o que resulta em blocos leves de grandes dimensões que não necessitam de maquinaria pesada, aumentando assim a velocidade de construção e diminuindo a produção de resíduos. Os fardos de

palha são particularmente adequados para construções pré-fabricadas, pois os riscos de danos causados pela água durante a sua construção e de incêndio associado à palha solta podem ser minimizados. Para além disso, tem inúmeras vantagens como explicita [27]:

- Evita a formação de pontes térmicas;
- É um material leve com processos de construção simples;
- O seu peso reduzido reduz assim a carga sobre as fundações, reduzindo por isso a necessidade de utilizar materiais com elevada energia incorporada (por exemplo betão);
- É um material renovável de baixo custo e local, que armazena carbono ao longo da sua vida;

No entanto, também carece de algumas limitações como:

- Propriedades inconsistentes (dimensões, densidade e teor de humidade), devido ao facto de ser um coproduto agrícola, o que pode constituir um problema durante a construção;
- Necessidade de proteger a palha de eventuais entradas de água, sendo por isso necessário ter cuidados redobrados nas áreas expostas;
- Requer abrigo até que os acabamentos possam ser aplicados.

Não é possível definir um único valor para condutividade térmica e calor específico da palha, uma vez que as suas propriedades térmicas podem ser afetadas por vários fatores, como por exemplo o tipo de palha utilizado, o teor de água presente, a densidade dos fardos, a orientação das fibras, entre outros. Assim, através dos valores disponíveis na literatura, é possível obter-se uma gama de valores [28]:

$$0,052 \leq \lambda [W/mK] \leq 0,12$$

Quanto ao calor específico, este encontra-se na gama de valores:

$$1338 \leq C_p [J/kgK] \leq 2000$$

Assim, o valor de resistência térmica de uma parede de fardos de palha varia de acordo com muitos fatores, incluindo o tipo de palha, o teor de humidade da palha, a sua densidade e orientação, assim como todos os outros elementos presentes na parede [29].

### 4.5.3.3 Cortiça natural

De tradição milenar, desde há muitos anos que a cortiça encontra em Portugal a sua principal fonte de produção, e sendo a casca do sobreiro (*Quercus Suber L.*), significa que é um tecido vegetal 100% natural, indo por isso ao encontro de um dos principais objetivos deste projeto, o de utilizar materiais locais e naturais.

Retirada a cada nove anos, sem que nenhuma árvore seja cortada durante este processo, a cortiça dá origem a uma infinidade de produtos, desde os tradicionais, aos mais inovadores e inesperados. Cada sobreiro demora 25 anos até poder ser descortiçado pela primeira vez e a cortiça retirada das duas primeiras extrações, assim como a que é retirada das podas da árvore, resultam em matéria prima para utilização na construção civil, como por exemplo isolamento e pavimentos. Por ser um produto renovável e reciclável é tida como um produto por excelência com consequências favoráveis para os

recursos naturais e para a sustentabilidade do planeta [30]. Assim, as características naturais da cortiça, como a porosidade, leveza, elasticidade, resistência ao fogo, à putrefação e água, contribuem para que o material desempenhe o papel de bom isolante térmico

#### 4.5.3.4 Aglomerado de cortiça expandida/aglomerado negro de cortiça

O aglomerado de cortiça expandida, também conhecido como aglomerado negro de cortiça define-se como um material vegetal e de estrutura celular que provém da expansão dos grânulos de cortiça, por ação do vapor de água que é produzido sem recurso a qualquer combustível fóssil, sendo apenas utilizada biomassa. Durante este processo não são utilizados quaisquer agentes sintéticos e o produto não sofre qualquer alteração das suas propriedades físicas e mecânicas durante o período de utilização, sendo que a aglomeração é feita com a sua própria resina [31]. Assim, para além de todas estas mais-valias, este produto tem uma elevada estabilidade dimensional, suportando grandes variações térmicas (entre  $-180^{\circ}\text{C}$  e  $120^{\circ}\text{C}$ ), é utilizado como isolamento térmico, acústico e antivibrático em simultâneo, promove o atraso térmico, aumenta a qualidade do ar interior e em caso de incêndio não liberta gases tóxicos [30]. Quanto às suas características térmicas, o aglomerado de cortiça expandida tem uma densidade compreendida entre  $100$  e  $120\text{kg/m}^3$ , uma condutividade térmica de  $0,04\text{W/m.K}$  e um calor específico de  $1560\text{ J/kg.K}$ . Desta forma, é o material com maior produção (derivado da cortiça) e mais aplicações na construção, representando cerca de “23% do volume de produção de produtos corticeiros” [32].

#### 4.5.3.5 Granulado de cortiça

O granulado de cortiça expandida é um subproduto obtido durante a fabricação do aglomerado de cortiça expandida. Assim, tem todas as vantagens descritas anteriormente para o aglomerado de cortiça assim como as características térmicas, diferendo apenas na densidade que está compreendida entre valores de  $60$  e  $70\text{kg/m}^3$  [33]. Para além da sua utilização na produção de aglomerados de cortiça, é “utilizado sobretudo como material para enchimento em caixas de ar ao construir tabiques ou paredes, sendo eficaz na maior parte dos casos em separações de andares de edifícios” [34].



Figura 4.12 Aglomerado de cortiça expandida (esquerda) e granulado de cortiça (direita) - [33]

## 4.6 Soluções construtivas

### 4.6.1 Paredes, pavimentos e cobertura

A tabela seguinte mostra os materiais utilizados para a soluções construtivas do exterior para o interior, assim como as suas características térmicas. A solução construtiva será em geral leve permitindo uma reduzida massa da casa, um método construtivo simplificado e uma rápida construção.

Tabela 4.2 - Propriedades dos materiais das soluções construtivas opacas utilizadas

		<i>Material</i>	<i>Espessura [m]</i>	<i>Condutividade [W/m.K]</i>	<i>Densidade [Kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>Calor Especifico [J/Kg.K]</i>
<b>Envoltente Vertical Exterior</b>	<b>Exterior</b>	<i>ThermoWood (D, pinho)</i>	0.02	0.099	400	1700
		<i>Ripado horizontal/caixa de ar</i>	0.02	0.14	600	2102
		<i>Membrana permeável</i>		-		
		<i>Ripado Vertical (Pinho Nacional)</i>	0.02	0.14	600	2102
		<i>Reboco de cal</i>	0.015	0.8	1600	1000
		<i>Isolamento (palha)</i>	0.365	0.052	110	600
		<i>OSB</i>	0.018	0.12	640	1550
		<i>Caixa de ar</i>	0.047			
	<b>Interior</b>	<i>Gesso cartonado</i>	0.024	0.25	900	840
<b>Envoltente Vertical Interior</b>	<b>Exterior</b>	<i>Gesso cartonado</i>	0.012	0.25	900	840
		<i>Estrutura de perfis de aço galvanizado leve</i>	0.005		-	
	<b>Interior</b>	<i>Gesso cartonado</i>	0.012	0.25	900	840
<b>Pavimento 1º piso</b>	<b>Exterior</b>	<i>Tábua de madeira maciça</i>	0.022	0.21	800	2376
		<i>Barrote de madeira maciça</i>	0.07	0.21	800	2376
		<i>Isolamento de cortiça</i>	0.03	0.04	110	1560
	<b>Interior</b>	<i>Gesso cartonado</i>	0.012	0.25	900	840
<b>Cobertura Horizontal Rés-do-chão</b>	<b>Exterior</b>	<i>Gesso cartonado</i>	0.012	0.25	900	840
		<i>Isolamento de cortiça</i>	0.03	0.04	110	1560
		<i>Barrote de madeira maciça</i>	0.07	0.21	800	2376
	<b>Interior</b>	<i>Tábua de madeira maciça</i>	0.022	0.21	800	2376

Desempenho térmico de edifícios com materiais de reduzida energia incorporada – caso de estudo de um sistema construtivo modular pré-fabricado

Tabela 4.3 (continuação) - Propriedades dos materiais das soluções construtivas opacas da habitação em estudo

		<i>Material</i>	<i>Espessura [m]</i>	<i>Condutividade [W/m.K]</i>	<i>Densidade [Kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>Calor Especifico [J/Kg.K]</i>
Pavimento rés-do-chão	<b>Exterior</b>	<i>Vigotas pré-esforçadas de cimento com abobadilhas de cerâmica</i>	0.15	1.04	1750	1000
		<i>Placa de aglomerado de cortiça negra</i>	0.04	0.04	110	1560
	<b>Interior</b>	<i>Pedra escura local (ardósia)</i>	0.05	2.3	2700	1000
Cobertura horizontal 1º piso	<b>Exterior</b>	<i>Linha de madeira (Pinho)</i>	0.1	0.04	70	1560
		<i>Isolamento granulado de cortiça</i>	0.03	0.04	70	1560
	<b>Interior</b>	<i>Gesso cartonado</i>	0.012	0.25	900	840
Pavimento Sótão	<b>Exterior</b>	<i>Gesso cartonado</i>	0.012	0.25	900	840
		<i>Isolamento granulado de cortiça</i>	0.03	0.04	70	1560
	<b>Interior</b>	<i>Linha de madeira (Pinho)</i>	0.1	0.04	70	1560
Parede desvão	<b>Exterior</b>	<i>Brita</i>	0.3	0.7	1800	1000
		<i>Tela de PVC</i>	0.01	0.23	1500	1512
		<i>Bloco de cimento</i>	0.15	0.41	1000	1044
	<b>Interior</b>	<i>Isolamento térmico XPS</i>	0.04	0.04	35	1260
Telhado	<b>Exterior</b>	<i>Telha cerâmica Plasma</i>	0.012	0.6	1500	800
		<i>Tela soft TYVEK (polietileno)</i>	0.005	0.35	950	1700
		<i>Ripa de madeira tratada (Pinho)</i>	0.05	0.14	600	2102
		<i>Vara de madeira tratada (Pinho)</i>	0.05	0.14	600	2102
		<i>Madre de madeira (Pinho)</i>	0.1	0.14	600	2102
	<b>Interior</b>	<i>Perna de madeira (Pinho)</i>	0.1	0.14	600	2102

Uma vez que a parede exterior tem uma reduzida inércia térmica devido ao facto de não possuir materiais muito pesados e maciços, esta deve ser maximizada nos materiais interiores do edifício. Devido a este facto, foi projetada uma parede de pedra no meio do interior da habitação entre a sala e a cozinha (Figura 4.5) e foi escolhido uma camada de cimento para o pavimento do rés-do-chão.

#### 4.6.2 Envidraçados

Quanto aos vãos envidraçados, as janelas exteriores serão constituídas por um vidro incolor duplo com caixa de ar [4+16+5]. A caixilharia será plástica (PVC) sem quadrícula, sem corte térmico, sem classificação nem aberturas autorreguladas e com sistema basculante. No que toca às proteções solares, estas serão feitas através de cortinas opacas de cor clara pelo interior. Tendo por base o ITE50, para vidros com estas características, o valor do coeficiente de condutividade térmica toma o valor de 2.5 W/m<sup>2</sup>.K. De seguida são apresentadas as características dos vidros utilizados nas janelas exteriores

Tabela 4.4 - Propriedades dos vidros utilizados na habitação em estudo

		<i>Material</i>	<i>Espessura (m)</i>	<i>Condutividade (W/m.K)</i>	<i>U-value [W/m<sup>2</sup>.K]</i>
<b>Envidraçados</b>	Exterior  Interior	<i>Vidro</i>	0.004	0.9	2.5
		<i>Espaço de ar</i>	0.016	0.04	
		<i>Vidro</i>	0.003	0.9	

#### 4.7 Sistemas de climatização

Para a climatização dos espaços úteis da habitação no inverno, será utilizada uma salamandra a lenha. Este tipo de solução é muito semelhante a uma lareira, uma vez que também utiliza madeira ou pellets como combustível, no entanto apresenta rendimentos superiores por se tratar de um sistema mais controlado de contenção de energia e calor [35]. Para além desta vantagem, a lenha é uma fonte de energia 2 vezes mais económica do que a eletricidade ou gás e é uma energia limpa e renovável, sendo por isso um modo de aquecimento sustentável e que participa ativamente na proteção do ambiente. Quanto à sua estética, existe uma grande variedade de estilos, desde as formas mais tradicionais às mais contemporâneas, fazendo com que a salamandra se torne um elemento decorativo da sala de estar [35]. Quanto aos sistemas renováveis, foi utilizado o programa Solterm para o dimensionamento do sistema solar térmico, tendo sido obtido o equipamento indicado na tabela 4.5. Quanto aos depósitos termoacumuladores de AQS, as suas características estão indicadas na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Características do equipamento de climatização

<b>Características</b>	<b>Equipamento</b>
Marca	Vulcano
Modelo	FCB-1S
Quantidade	2 módulos
Área total [m <sup>2</sup> ]	3,90
Rendimento ótico [%]	69
E-Solar [kWh]	2290
Orientação	Sul
Inclinação [°]	20

Tabela 4.5 - Características do depósitos termoacumuladores

<b>Características</b>	<b>Equipamento</b>
Marca	Vulcano
Modelo	ES200L
Quantidade	1
Potência útil [W]	2500
Capacidade [l]	200
Rendimento [%]	95





## Capítulo 5. Caracterização das soluções construtivas de fachadas

Neste capítulo serão apresentados os três tipos de construção de parede exterior estudados, sendo que será apresentada mais detalhadamente a solução construtiva da habitação analisada. Assim, decidiu-se estudar dois dos sistemas construtivos mais utilizados em Portugal (sistema ETICS associado a parede simples e parede dupla com isolamento interior) para uma posterior comparação com a solução de fachada utilizada na casa em estudo.



### 5.1 Tipos de construção

#### 5.1.1 Sistema ETICS

Os sistemas ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems) são classificados como revestimentos de isolamento térmico constituídos por uma camada de isolante térmico fixada no exterior das fachadas por um produto de colagem e/ou fixação mecânica, sendo posteriormente revestidas por um reboco delgado aplicado em várias camadas, armado com uma ou várias redes de fibra de vidro e protegido por um acabamento, geralmente de ligante sintético [36]. Este tipo de sistema pode ser aplicado em paredes de alvenaria, que é qualquer elemento construtivo constituído por um conjunto de materiais pétreos, naturais ou artificiais, unidos entre si por meio de uma argamassa e constituídas normalmente por tijolos, blocos de betão ou blocos de betão celular autoclavado, ou em paredes de betão [24]

O tipo de isolante térmico mais utilizado nas construções típicas em Portugal é o EPS (poliestireno expandido moldado), mas também se usam o XPS (poliestireno expandido extrudido) e o ICB (placas de aglomerado de cortiça expandida), sendo que as espessuras mais comuns das placas são da ordem de 40 mm a 60mm [24].



Figura 5.1 - Representação do sistema ETICS.

Do ponto de vista da eficiência energética, o isolamento pelo exterior é o que apresenta melhores resultados, tendo várias vantagens, como [37]:

- Aumento da inércia térmica do interior dos edifícios, pois a totalidade da massa da parede da fachada encontra-se disponível para acumular os ganhos internos de energia. Assim, durante o inverno e verão existirá um aumento do conforto térmico uma vez que os ganhos solares aumentam e devido à capacidade de regulação da temperatura interior, respetivamente. Com isto, existirá uma redução nas necessidades de climatização das habitações, o que leva a uma poupança energética;
- Redução ou mesmo eliminação das pontes térmicas lineares, o que permite um isolamento térmico sem interrupções nas zonas da estrutura;
- Diminuição do risco de condensações no interior da parede, isto porque o sistema é impermeável à água no estado líquido, no entanto permite a passagem do vapor de água, facilitando assim a saída da humidade acumulada no interior;
- Aumento da área útil no interior do espaço habitável devido à menor espessura da parede.

### 5.1.2 Parede de alvenaria dupla

A parede dupla é o tipo de parede exterior mais comum, atualmente, em Portugal [38], sendo este um sistema composto por dois panos paralelos de alvenaria, um exterior e outro interior, formando preferencialmente um espaço de ar. Os dois panos de alvenaria podem ser compostos por diversos tipos de materiais como o tijolo de barro vermelho (maciço ou furado), blocos de betão leve, entre outros. É na caixa de ar entre os dois panos que ocorrerá a recolha da eventual acumulação de água, sendo por isso necessário que esta esteja drenada, ventilada e limpa. Como neste espaço o calor transmite-se essencialmente por radiação e convecção, é colocado o isolamento térmico preferencialmente junto ao pano de parede interior e de forma a evitar a formação de pontes térmicas, para que exista um desempenho térmico superior [39]. No entanto, como já dito anteriormente, este isolamento não deverá preencher totalmente a caixa de ar, pois é aconselhável a permanência de um espaço de ar junto ao pano exterior da parede, que tem como função contribuir para a secagem e drenagem de humidades que podem eventualmente existir., proporcionando dissipação de calor, reduzindo por isso os ganhos solares para o interior.



Figura 5.2 - Representação do sistema de parede dupla

### 5.1.3 Parede pré-fabricada para o projeto em estudo

A parede deste projeto caracteriza-se por painéis pré-fabricados, de dimensões médias, constituídos por uma moldura de madeira, na qual é introduzido o isolamento. Como já dito anteriormente, uma vez que foi a construção com fardos de palha que inspirou o projetista, os módulos de parede foram concebidos tendo em conta as dimensões dos fardos disponíveis no mercado nacional. Assim, os fardos são montados numa estrutura de madeira constituindo um módulo autoportante, com um sistema de encaixe machado que faz a ligação entre módulos e também ao pavimento. O módulo pode ser integrado numa estrutura existente com funções de enchimento ou ter funções resistentes participando numa estrutura de malha de parede resistente.

O módulo é fixo ao pavimento através de um elemento de madeira ilustrado no esquema 1 da figura 5.3. A estrutura de elementos verticais e horizontais de madeira maciça (esquema 2) define ao mesmo tempo o sistema de encaixe machado nas quatro faces. De forma a aumentar a rigidez estrutural do módulo, as laterais e topo são constituídos por painéis de madeira estrutural, fixados mecanicamente aos elementos de madeira maciça, que vão conter o isolamento térmico (esquema 3). O esquema 4 representa o módulo preenchido pelo isolamento e é colocado um painel e madeira estrutural pelo interior que aumenta a rigidez do módulo. Os esquemas 5 e 6 ilustram uma estrutura horizontal e vertical que pode ser aplicada nos espaços vazios, entre os módulos, que aumentam assim a rigidez da estrutura e permitem, por exemplo, suportar as cargas de vários pisos ou de uma cobertura ajardinada. Este espaço pode funcionar também como zona técnica ou então ser apenas preenchido com isolamento térmico [40].

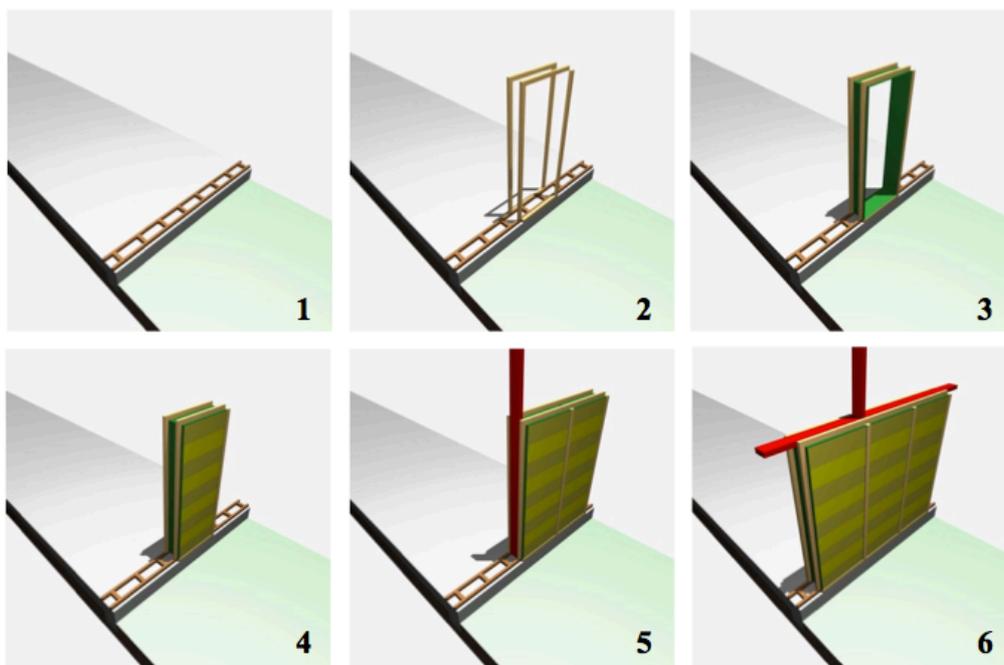


Figura 5.3 - Esquema da montagem e montagem dos módulos



## Capítulo 6. Comportamento térmico de fachadas

De modo a perceber qual a diferença entre o desempenho de cada tipo de parede, foi estudado o seu comportamento térmico através do cálculo do coeficiente de transmissão térmica. Como já dito anteriormente, este coeficiente é o fluxo de calor por unidade de área, em regime estacionário, para uma diferença de temperatura unitária e é expresso em  $W/(m^2K)$  [6]. Assim, quanto menor for este valor, melhor desempenho térmico terá a parede, o que irá permitir melhores condições de isolamento e, conseqüentemente, um menor valor de carga de aquecimento.

### 6.1 Sistema ETICS

Com base no ITE50 [41], apresentam-se de seguida os valores de transmissividade térmica para um sistema de isolamento térmico pelo exterior com revestimento aplicado sobre o isolante (ETICS). Decidiu-se optar pelo isolante EPS uma vez que, como dito anteriormente, é o mais utilizado com este sistema em Portugal. Quanto ao pano de alvenaria, optou-se pelo tijolo furado uma vez que é este o material predominante na construção no nosso país.

Tabela 6.1 - Valores do coeficiente de transmissão térmica do sistema ETICS.

Isolante térmico EPS [mm]	Alvenaria	U [ $W/m^2K$ ]
30		0,67
40	Tijolo furado	0,58
60	[0,20 a 0,24 m]	0,45
80		0,37

### 6.2 Parede dupla

Tendo por base novamente o ITE50 [41] apresentam-se de seguida os valores do coeficiente de transmissão térmica para uma parede dupla de fachada em que o isolante preenche parcialmente o espaço de ar. Foi mais uma vez escolhido o EPS como isolante e o tijolo furado como pano de alvenaria, tendo como justificação a dada anteriormente.

Tabela 6.2 - Valores de coeficiente de transmissão térmica do sistema de parede dupla

Isolante térmico EPS [mm]	Alvenaria	U [ $W/m^2K$ ]
30		0,64
40	Tijolo furado	0,55
60	[0,11 m]	0,43
80		0,35

### 6.3 Parede pré-fabricada para o projeto em estudo

A constituição da fachada da habitação em estudo é bastante distinta da que normalmente se utiliza em Portugal, como já mostrado em 5.1.3. Como já referido anteriormente, o objetivo do projetista é o de construir uma habitação com materiais de baixo carbono e energia incorporada, nomeadamente o isolamento térmico, sendo que foram estudados vários tipos de isolamento para uma posterior comparação com o de fardos de palha, como será mostrado mais à frente.

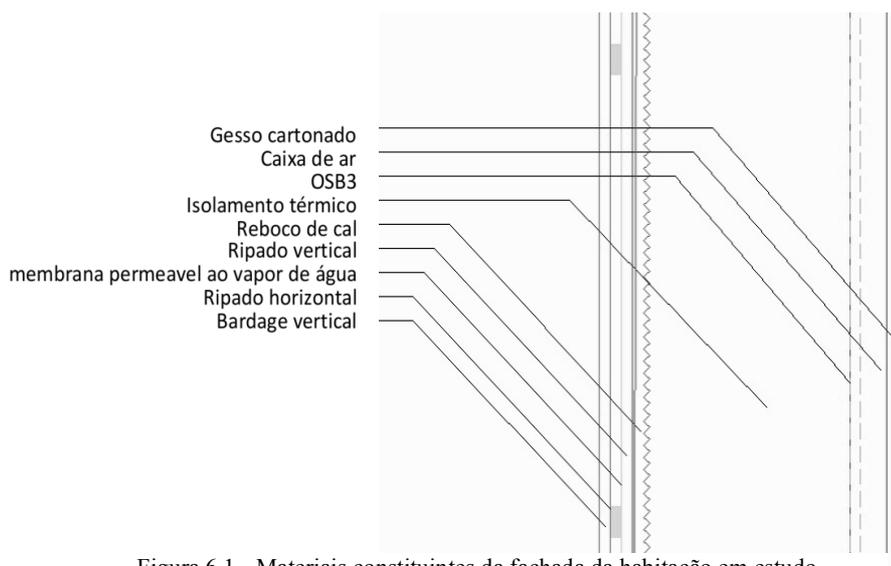


Figura 6.1 - Materiais constituintes da fachada da habitação em estudo

Após a análise dos primeiros ensaios realizados ao módulo de parede, percebeu-se que a solução poderia ser melhorada. Primeiramente o módulo era rebocado por fora com uma argamassa de cal e argila que isolava e ao mesmo tempo regulava a humidade da palha, evitando assim que esta apodrecesse. A evolução passou pela colocação de uma placa OSB no lado exterior do módulo, fazendo com que este se transformasse num “recipiente” onde se poderiam colocar outros isolamentos térmicos como por exemplo a cortiça. Assim, alterando apenas o acabamento exterior por uma placa de madeira estruturada possibilitaria a utilização de outro tipo de isolamento térmico/acústico com baixo carbono incorporado e que não limitasse a espessura do módulo como acontece com os fardos, como por exemplo a cortiça, casca de arroz, papel reciclado, lã de ovelha, entre outros materiais locais. Esta solução permite ainda modificar facilmente as dimensões do módulo, eliminar as necessidades de reboco externo (tornando por isso a construção mais rápida) e reutilizar o módulo de forma integral ou reciclar todos os materiais [40].

Deste modo, foi calculado o coeficiente global de transferência de calor do módulo, fazendo variar o tipo de isolamento. Uma vez que os módulos de parede foram concebidos tendo em conta as dimensões dos fardos de palha disponíveis no mercado nacional, fez-se apenas variar o tipo de isolamento deixando fixa a espessura deste. Foi então calculado o valor do coeficiente de transmissão térmica para uma solução de fachada com caixa de ar estanque.

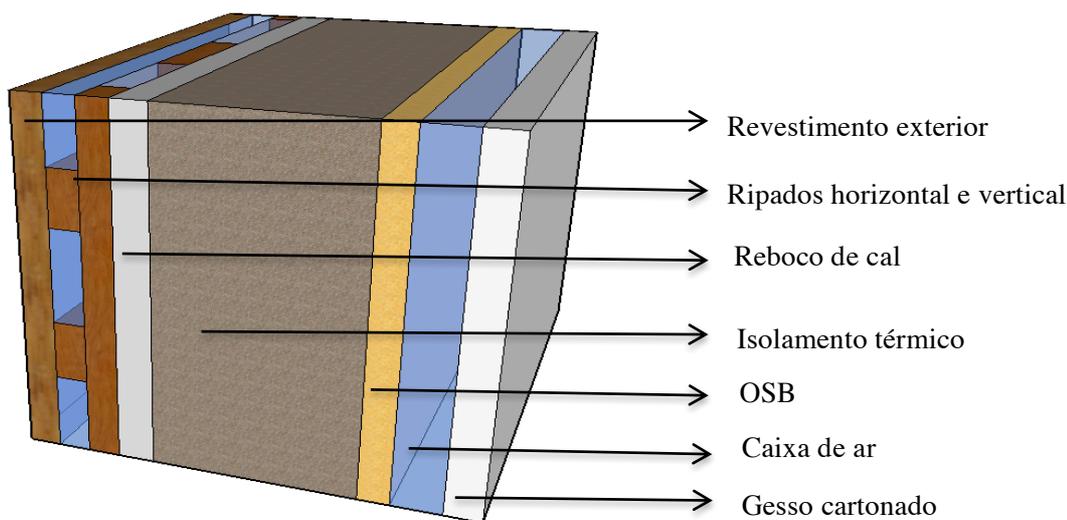


Figura 6.2 Representação da solução construtiva da fachada da habitação em estudo

Uma vez que o coeficiente de transmissão térmica é calculado através do inverso da resistência térmica do conjunto total, foi necessário calcular este parâmetro:

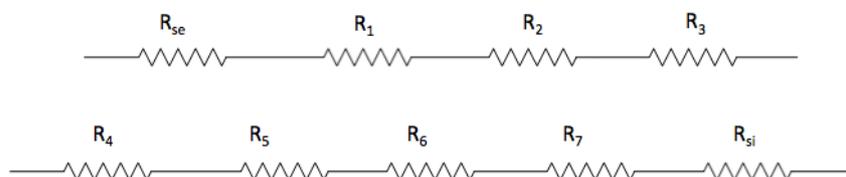


Figura 6.3 Esquema representativo das resistências térmicas consideradas

Em que:

$R_{se}$  – Resistência térmica superficial exterior

$R_5$  – Resistência térmica do OSB

$R_1$  – Resistência térmica da madeira (ThermoWood)

$R_6$  – Resistência térmica do ar

$R_2$  – Resistência térmica do conjunto (Ripado + Ar//  
Ripado + Ripado // Ar + Ar)

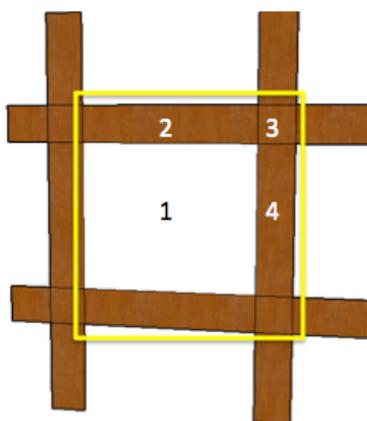
$R_7$  – Resistência térmica do gesso cartonado

$R_3$  – Resistência térmica do reboco de cal

$R_{si}$  – Resistência térmica superficial interior

$R_4$  – Resistência térmica do isolamento

Uma vez que os ripados não se encontram intersetados entre si, foi necessário calcular uma resistência equivalente do conjunto ( $R_2$ ):



$$\text{Área 1} = 0,1685 \text{ m}^2$$

$$\text{Área 2} = 0,0251 \text{ m}^2$$

$$\text{Área 3} = 0,0025 \text{ m}^2$$

$$\text{Área 4} = 0,0186 \text{ m}^2$$

Figura 6.4 Esquema representativo da estrutura reticulada formada pelos ripados de madeira

Assim, considerou-se que o padrão da figura 6.4 se repetia ao longo do módulo e fez-se então o cálculo da resistência equivalente do conjunto dos ripados vertical e horizontal:

$$\frac{\text{Área}_{\text{total}}}{R_2} = \frac{A_x}{R_x} + \frac{A_y}{R_y} + \frac{A_z}{R_z} \Leftrightarrow R_2 = \frac{\text{Área}_{\text{total}}}{\frac{A_x}{R_x} + \frac{A_y}{R_y} + \frac{A_z}{R_z}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R_2 = \frac{0,2147}{\frac{0,0025}{0,29} + \frac{0,0437}{0,32} + \frac{0,1685}{0,18}} \Leftrightarrow R_2 = 1,49 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Equação 6.1

Em que:

$$A_x = \text{Área 3}$$

$R_x$  = Resistência térmica do conjunto ripado + ripado

$$A_y = \text{Área 2} + \text{Área 4}$$

$R_y$  = Resistência térmica do conjunto ripado + ar

$$A_z = \text{Área 1}$$

$R_z$  = Resistência térmica do conjunto ar + ar

Assim,

$$U = \frac{1}{R_{\text{total}}} \quad \text{Equação 6.2}$$

onde  $R_{total} = R_{se} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_{si}$

De forma a determinar o coeficiente de condutividade térmica para cada tipo de isolamento térmico, aplicaram-se as fórmulas anteriores variando apenas a condutividade térmica  $\lambda$  do material isolante. Os resultados obtidos para o coeficiente de transmissão térmica da fachada para cada tipo de isolamento encontram-se na tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Valores do coeficiente de transmissão térmica do módulo para cada tipo de isolamento

<b>Materiais de isolamento térmico [espessura=36,5cm]</b>	<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>
Fibras têxteis	0,076
Fibras de celulose	0,096
Fibras de cânhamo	0,096
Lã de ovelha	0,098
Fibras de Côco	0,12
Granulado de cortiça	0,12
Fardos de palha	0,19
Casca de arroz	0,16
Argila expandida	0,23



## Capítulo 7. Simulação Térmica

### 7.1 Modelo geométrico

Como mencionado anteriormente, a construção do modelo geométrico foi realizada recorrendo ao programa Google Sketchup 2015, permitindo assim a reprodução gráfica da habitação (como a sua arquitetura, vãos envidraçados, sombreamentos) para uma posterior caracterização mais detalhada no EnergyPlus (como as soluções construtivas, as propriedades óticas dos vidros e dos sombreamentos, entre outros). Tendo por base o REH, as medições das dimensões devem-se traduzir em peças desenhadas que incluam informação relativa às áreas e dimensões dos diferentes elementos construtivos, sendo que as medições necessárias ao levantamento dimensional devem ser efetuadas pelo interior [6]. Uma vez que o EnergyPlus não atribui espessura às soluções construtivas, estas são representadas por planos em que a espessura atribuída aos materiais serve apenas para o cálculo do seu coeficiente de transmissão térmica e para se considerar o efeito da massa superficial.

Assim, foram desprezadas todas as espessuras relativamente às paredes exteriores. Quanto às paredes interiores, decidiu-se ceder para cada zona metade da espessura das paredes, o que fez com que as áreas de pavimento aumentassem ligeiramente. Teve que se optar por esta simplificação uma vez que se as espessuras fossem totalmente desprezadas, a área do primeiro piso seria inferior à área do rés-do-chão. Assim, contabilizando as condições descritas, o modelo ficou com uma área útil superior em menos de 5% à planta de arquitetura original, o que não terá grande influência nos resultados.

Nas figuras 7.1 e 7.2 é possível observar a geometria da habitação em estudo. Na primeira figura está representada uma perspetiva em que se pode observar as fachadas Sul e Este. Na segunda figura podem ser observadas as fachadas Norte e também Este (direita), e na imagem à esquerda as fachadas Norte e Oeste.

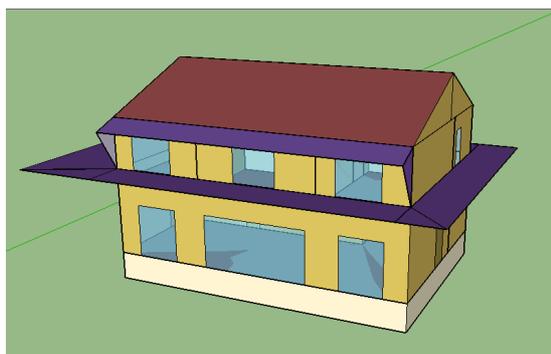


Figura 7.1 - Desenho Sketchup da habitação em estudo.

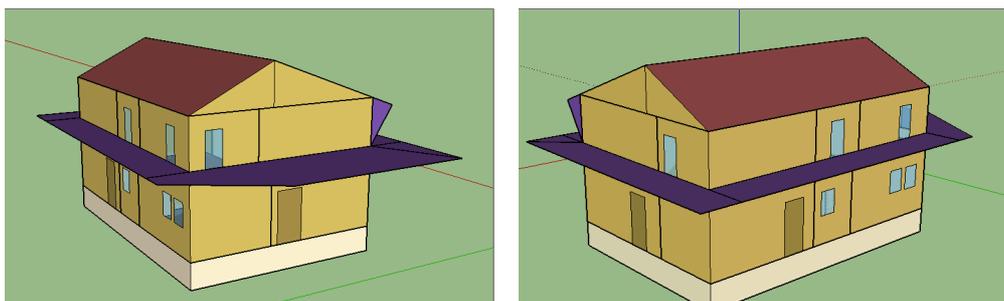


Figura 7.2 - Desenho Sketchup da habitação em estudo – perspetivas.

## 7.2 Zonamento térmico

A caracterização de zonas térmicas no EnergyPlus deve ser feita tendo em conta as características da ocupação dos espaços, a sua orientação geográfica e consequentemente a exposição solar, assim como os sistemas técnicos instalados. Cada zona térmica deve ser simulada de forma autónoma, podendo, no entanto, ser possível agregar espaços que tenham as características descritas anteriormente semelhantes, o que não acontece neste caso.

O zonamento da habitação em estudo foi feito considerando cada divisão como uma zona térmica independente. Existe a possibilidade de a sala estar em contacto direto com a cozinha devido à porta de correr, no entanto, para simplificar a simulação e visto que se pretende analisar o comportamento térmico das duas zonas em separado, foram consideradas como duas zonas térmicas distintas. Quanto à zona do hall de entrada (figura 7.3 e 7.4), optou-se por simplificar e não considerar o vão de escadas, uma vez que não iria ter uma influência considerável nos resultados finais. Uma vez que desta forma a área útil do modelo aumentou (uma vez que a zona de arrumos por baixo das escadas não era considerada útil), optou-se por compensar este ganho retirando parte do piso superior.

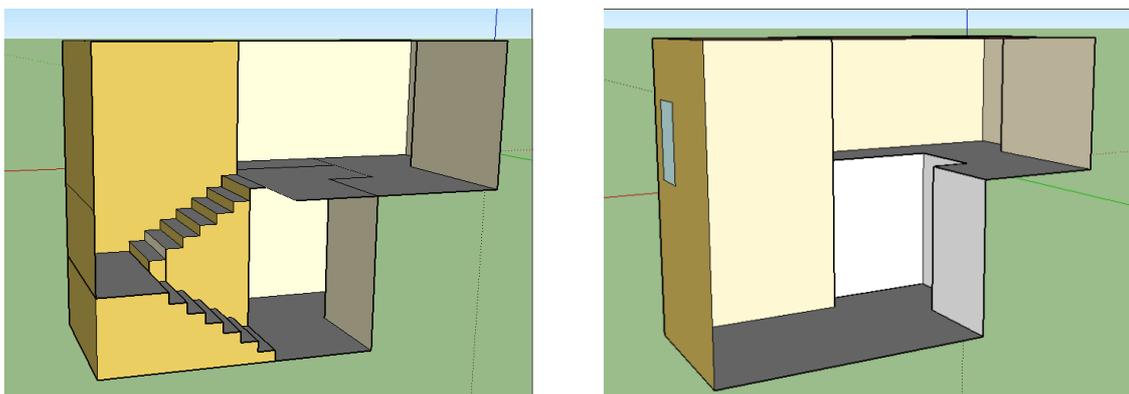


Figura 7.3 - Zonamento do hall de entrada real (esquerda) e simplificado (direita)

Quanto ao sótão e desvão, apesar de se tratarem de espaços não úteis, ou seja, que não vão ser climatizados, também foram tidos em conta no zonamento térmico uma vez que será necessário definir infiltração e ventilação natural para estas zonas.

## 7.3 Soluções construtivas e sombreamento

Para caracterizar os materiais constituintes da habitação foi utilizado o objeto *Material*, onde se colocaram os valores de espessura, condutividade térmica, densidade e calor específico (Tabela 4.2 e 4.3), deixando os restantes valores por defeito.

Para caracterizar a caixa de ar para os elementos opacos, nomeadamente a sua resistência térmica, foi utilizado o objeto *Material:AirGap*. Uma vez que se considerou o espaço de ar estanque, o valor de resistência térmica utilizado teve por base a tabela seguinte de valores da resistência térmica dos espaços de ar não ventilados [42].

Tabela 7.1 - Resistência de espaços de ar consoante a direção e fluxo do calor e espessura

Direção e sentido do fluxo de calor	Espessura (mm)	R <sub>ar</sub> [m <sup>2</sup> .°C/w]
Horizontal	< 5	0,00
	5	0,11
	10	0,15
	15	0,17
	25 a 300	0,18
Vertical ascendente	< 5	0,00
	5	0,11
	10	0,15
	15 a 300	0,16

Quanto aos envidraçados, estes foram definidos através do objeto *WindowMaterial:Glazing* onde foram colocadas as suas propriedades óticas que foram obtidas através da biblioteca de vidros do software *Window 7.4*.

Tabela 7.2 - Propriedades óticas dos vidros considerados no modelo

		3mm	4mm
<b>Solar</b>	Transmissividade (front)	0.903	0.898
	Transmissividade (back)	0.903	0.898
	Refletividade(front)	0.08	0.08
	Refletividade (back)	0.08	0.08
<b>Visível</b>	Transmissividade (front)	0.913	0.912
	Transmissividade (back)	0.913	0.912
	Refletividade(front)	0.082	0.082
	Refletividade (back)	0.082	0.082
<b>Infravermelho</b>	Transmissividade	0	0
	Emissividade (front)	0.840	0.840
	Emissividade (back)	0.840	0.840

Uma vez que se trata de um vidro duplo, existe um espaço de ar entre eles de 16mm, definido através do objeto *WindowMaterial:Gas*.

Existindo sombreamento interior, foi necessário caracterizar as propriedades das cortinas no objeto *WindowMaterial:Shade*, tendo optado por se utilizar as do tipo “roller shade”. Este tipo de cortina é um dos sistemas de sombreamento interior mais utilizado devido à sua fácil operação e baixo custo. Ele é manual ou automaticamente controlado de forma a satisfazer as necessidades dos ocupantes tanto em termos de conforto térmico como de privacidade. Uma vez que estas cortinas são consideradas difusores perfeitos, as suas propriedades óticas são geralmente assumidas como constantes e independentes do ângulo de incidência, e é também assumido que os valores de transmissividade, refletividade e absorvidade são iguais para ambos os lados das cortinas [43]. A

tabela 7.3 mostra os valores indicados pelo ASHRAE (2001) para as características das cortinas interiores.

Tabela 7.3 - Propriedades de cortinas interiores – [43]

Cortinas de rolo	Transmissividade	Refletividade	Absortividade
<b>Translúcido claro</b>	<b>0.25</b>	<b>0.6</b>	<b>0.15</b>
Opaco médio	0.00	0.65	0.35
Opaco escuro	0.00	0.2	0.80

Após a caracterização de todos os materiais constituintes da envolvente foi necessário definir a construção de cada superfície e vão. Assim, através do objeto *Construction* é possível definir a solução construtiva das paredes interiores, exteriores, pavimentos, coberturas, janelas e portas. As camadas são ordenadas das mais exteriores para as mais interiores.

Após este passo, foi necessário definir o sombreamento das janelas assim como o tipo de controlo de ativação. Através do objeto *WindowProperty:ShadingControl*, foi definido o sombreamento pelo interior e foi imposto que as cortinas estariam ativas sempre que a temperatura interior da zona fosse superior a 22°C. Optou-se por este valor de ativação uma vez que foi com o qual se obtiveram melhores resultados em termos de cargas anuais, ou seja, menores valores para aquecimento e arrefecimento da habitação.

## 7.4 Modelação do solo

A modelação das superfícies em contacto com o solo pode ser feita de duas maneiras: inserindo diretamente as temperaturas médias mensais do solo no objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface* ou utilizando o objeto *Detailed Ground Heat Transfer*, permitindo obter resultados mais realísticos. Assim, neste objeto deve-se optar entre dois modelos: o Slab e o Basement. Ambos simulam a influência que o solo tem nas temperaturas interiores do edifício, principalmente nas zonas em contacto com este, caracterizando um processo iterativo. O Slab é utilizado para modelos onde o edifício está assente no solo, por outro lado o Basement é utilizado em edifícios que possuem zonas enterradas como caves ou desvãos [44]. Optou-se no entanto por utilizar a abordagem mais simples definindo-se as temperaturas do solo a 2 metros de profundidade fornecidas pelo ficheiro climático (.stat) no objeto já mencionado.

## 7.5 Ganhos internos

Como já dito anteriormente, os ganhos internos de um edifício são derivados da ocupação, equipamentos e iluminação. Assim, foram feitos perfis de ocupação de modo a estimar os ganhos devidos à presença humana e perfis de utilização (de luzes e equipamentos elétricos) com o fim de estimar consumos energéticos existentes.

### 7.5.1 Ocupação

Relativamente à ocupação dos espaços e de forma a tornar a simulação o mais realista possível, foi utilizado um perfil de ocupação típico de uma habitação com quatro pessoas, dois adultos e duas crianças [45]. Assim, considerou-se um padrão para os dias de semana em que todos ocupantes apenas se encontram na habitação num pequeno período da manhã e da hora de almoço, regressando no final do dia, sendo o período da noite o que tem a maior taxa de ocupação. Quanto aos fins de semana o padrão não difere muito, no entanto o período de ocupação da casa é superior. A tabela 7.4 mostra o padrão de ocupação das zonas utilizado na simulação, sendo que para estes serem representados no EnergyPlus, é necessário criar *schedules* através do objeto *Schedules: Compact*.

Tabela 7.4 - Padrão de ocupação das zonas – adaptado de [45]

		Ocupantes			
		Perfil			
Zona Térmica	Nível* (%)	Dias de Semana		Fins de Semana	
Desvão	0	Always off			
Cozinha	50	On desde	7h às 8h	On desde	8h às 9h
	100		8.00 às 9h		9h às 10h
	100		12h30 às 14h30		13h às 15h
	50		19h às 20h		19 às 20h
	100		20h às 21h		20h às 21h
Casa de banho 1	25		7h às 8h		8h às 9h
	25		19h às 20h		19h às 20h
Sala	100		21h às 22h		21h às 23h
	50		22h à 00h		22h às 00h
BR1	25		22h às 7h		23h às 8h
BR2	25	22h às 7h	23h às 8h		
BR3	50	00h às 7h	1h às 8h		
Casa de banho 2	25	7h às 8h	8h às 9h		
	25	19h às 20h	19h às 20h		
Sótão	0	Always off			

\*100% representa 4 ocupantes

### 7.5.2 Equipamentos elétricos

Quanto aos equipamentos elétricos, teve-se por base o total anual de eletricidade de uma “Família Ecológica” que se preocupa com os problemas energéticos e ambientais, tendo apenas equipamentos classe A, como se pode observar na tabela 8.5 [46]. Para se ter em conta estes ganhos internos, utilizou-se o objeto *ElectricEquipment* em que a partir do total de eletricidade gasta num ano e tendo em consideração o padrão de utilização considerado, se definiu uma potência para cada equipamento elétrico. Assim, considerou-se que todos os equipamentos audiovisual e computadores se encontram na sala e são utilizados no mesmo período em que a zona está ocupada. Quanto ao frigorífico e congelador, considerou-se que se encontram todo o ano ativos e o forno apenas duas horas por dia, uma ao almoço e outra ao jantar. No que toca à máquina de lavar loiça e à de lavar roupa, considerou-se que seriam utilizadas apenas meia hora por dia, todos os dias.

Tabela 7.5 - Consumos de energia elétrica e potência média para a utilização de um conjunto de equipamentos eficientes existentes numa habitação

Equipamentos	kWh/ano	W
Frigorífico	140	16
Congelador	225	25,7
Máquina de lavar loiça	264	1446,5
Máquina de lavar roupa	180	986,3
Forno elétrico	250	342
Computador	95	52,1
Audiovisual	220	120,5
Total	1534	

### 7.5.3 Iluminação

Quanto à iluminação, optou-se por recriar um padrão de utilização que correspondesse o máximo possível à realidade. Uma vez que no modelo de simulação apenas se consideraram ocupantes nas zonas da sala, cozinha e quartos, consideraram-se também apenas os ganhos internos dos equipamentos de iluminação desses espaços, e apenas quando os ocupantes se encontram presentes. Na tabela 8.6 pode-se então observar os perfis de utilização da iluminação, tendo em conta que a casa seria habitada por uma família de dois adultos e duas crianças.

Tabela 7.6 - Padrões de iluminação

	<b>Dias de semana</b>	<b>Fins de semana</b>	<b>Densidade de potência instalada</b>
<b>Sala</b>	21h-00h -100%	21h-00h – 100%	6W/m <sup>2</sup>
<b>Quarto 1 e 2 (crianças)</b>	22h-22h30 – 100%	22h30-23h -100%	5W/m <sup>2</sup>
<b>Quarto 3 (adultos)</b>	23h-00h – 100%	00h-1h00 – 100%	5W/m <sup>2</sup>
<b>Cozinha</b>	19h-21h – 100%	19h-21h – 100%	10W/m <sup>2</sup>

Para além destes padrões, outros aspetos são mantidos entre simulações, como os algoritmos de modelação de sombreamento, transferência de calor e de balanço de energia – os adotados por defeito pelo programa.

## 7.6 Sistema Ideal Loads

De forma a contabilizar as cargas de aquecimento e arrefecimento necessárias para que a casa se encontre dentro das temperaturas de conforto, foi utilizado o objeto *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem* que caracteriza um sistema ideal para fornecer o ar condicionado necessário para que os requisitos de conforto de cada zona sejam cumpridos. Para o programa saber qual é então essa gama de temperaturas, foi utilizado o objeto *HVACTemplate:Thermostat* e definidos os valores para os quais o sistema é ativado, sendo que para a comparação entre os resultados obtidos por simulação dinâmica e os obtidos através da folha de cálculo foram 18-25°C e para os restantes estudos 20-25°C.

Uma vez que este objeto não traduz qual o gasto energético do sistema de climatização, foi considerada uma bomba de calor onde foi calculado o seu COP dinâmico a partir das equações 7.1 e 7.2 [47]:

$$COP_{aquecimento} = \eta \times \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}} \quad \text{Equação 7.1}$$

$$COP_{arrefecimento} = \eta \times \frac{T_{evap}}{T_{cond} - T_{evap}} \quad \text{Equação 7.2}$$

Em que COP designa o coeficiente de desempenho da máquina,  $\eta$  a eficiência do sistema de climatização,  $T_{cond}$  a temperatura de condensação (K) e  $T_{evap}$  a temperatura de evaporação (K). Os parâmetros das duas equações encontram-se na tabela 8.7, sendo que a temperatura horária foi fornecida pelo ficheiro climático.

Tabela 7.7 - Parâmetros utilizados para cálculo das cargas elétricas de climatização - [47]

	Aquecimento	Arrefecimento
$T_{dist}$	50	0
$T_{cond}$	$T_{dist}+5$	$T_{exterior}+5$
$T_{evap}$	$T_{exterior}-5$	$T_{dist}-5$
$\eta$		0,2

## 7.7 Infiltração

A infiltração de um edifício consiste na entrada não controlada do ar através das frinchas na envolvente, nomeadamente nas caixas de estores, das janelas e portas. Devido à sua reduzida dimensão, forma irregular e mesmo variação de dimensões sazonal, as frinchas criam condições fronteira de difícil implementação por métodos analíticos e computacionais. Uma vez que não seria viável calcular os caudais de ar trocados entre o interior e o exterior do edifício através destas [48], foi definido um valor constante de entrada de ar de 0,6 RPH no Verão e 0m4RPH no Inverno.

Para a infiltração ser contabilizada no modelo, foi utilizado o objeto *ZoneInfiltration: DesignFlowRate* onde se definiu que uma entrada de ar constante ao longo de todo o ano e o valor da taxa em renovações por hora.

## 7.8 Ventilação natural

Como já dito anteriormente, a ventilação natural consiste na admissão de ar vindo do exterior numa determinada zona térmica, com o principal intuito de diminuir as necessidades de arrefecimento.

Existem várias formas de introduzir a ventilação natural em EnergyPlus, no entanto, uma vez que este trabalho não trata especificamente este assunto e o objetivo é apenas considerar a ventilação natural para caracterizar o desempenho energético da casa, optou-se por utilizar um modelo mais simplificado. Assim, foi utilizado o objeto *ZoneVentilation:WindandStackOpenArea*, onde o fluxo de ar é uma função da velocidade do vento e do chamado efeito chaminé juntamente com a área de abertura considerada em cada zona térmica, onde a ventilação ocorre por diferencial de pressão/temperatura. No entanto, uma vez que não foram utilizadas portas entre zonas no modelo, a ventilação por efeito chaminé não foi contabilizada. Assim, para este objeto o caudal não é fixo, sendo

calculado com base nas condições do interior e exterior e calculado pelo programa. A equação base para o cálculo da taxa de ventilação neste modelo é a seguinte:

$$Q_w = C_w A_{\text{opening}} F_{\text{schedule}} V \quad \text{Equação 7.3}$$

Onde:

$Q_w$  = Taxa de fluxo de ar volumétrico impulsionado pelo vento

$C_w$  = Efetividade da abertura

$A_{\text{opening}}$  = Área de abertura

Este objeto foi definido para todas as zonas que se pretende que exista ventilação natural, e para cada uma delas foi definido o valor de área de abertura, o horário de fração de abertura, a diferença em metros do ponto médio das janelas até ao ponto de pressão neutra, o coeficiente de descarga de abertura e os valores de temperatura que ditarão a ativação da ventilação. Estes valores correspondem à temperatura mínima e máxima interior abaixo e acima da qual a ventilação é desativada, ou seja, se estas forem definidas como 20°C e 28°C, respetivamente, sempre que a temperatura da zona for inferior a 20°C e superior a 28°C, a ventilação é automaticamente desativada, evitando assim um arrefecimento ou aquecimento indesejado. Foram também definidos valores de temperatura exterior máxima e mínima, seguindo o mesmo raciocínio descrito anteriormente. Uma vez que num dos estudos se pretende simular um cenário realístico, foi necessário garantir que o sistema *IdealLoads* não funcionasse ao mesmo tempo em que as janelas estariam abertas. Assim, de forma a prevenir um funcionamento simultâneo, foi necessário realizar várias simulações com diferentes valores de temperatura mencionados anteriormente e observar, através dos outputs do número de renovações na zona e da energia requerida para arrefecimento, se estes existiam simultaneamente em cada hora. Assim, foram adotados dois conjuntos de valores, um para um cenário apenas com ventilação natural e outro para um cenário com os dois sistemas. Quanto aos critérios adotados para cada escolha, estes basearam-se no número de horas de desconforto na habitação para o primeiro cenário, tentando que fosse o menor possível, e no número de horas com os dois sistemas em simultâneo para o segundo cenário, tentando novamente que este fosse o mais reduzido.

Considerou-se que apenas existiria ventilação natural quando os ocupantes estavam presentes na zona, e para cada uma delas fez-se um horário onde se definiu a percentagem de área de abertura disponível para a entrada de ar em função do número de renovações por hora dentro da zona térmica. Tendo por base [9], fez-se limitar a entrada de ar a 6 renovações por hora em todas as zonas da habitação. No entanto, o sistema de ventilação natural das habitações deve ser geral e permanente, ou seja, devem existir aberturas permanentes autorreguláveis para admissão de ar aos quartos e salas, e por outro lado todos os compartimentos de serviço (cozinha e casas de banho) devem dispor de extrações cujo somatório dos caudais seja da ordem de 0,6 a 0,8 renovações por hora. Uma vez que é imprescindível, no período de Inverno, garantir uma ventilação dos edifícios qualquer que seja a zona climática em que o edifício se localiza, foi imposto um caudal permanente de infiltração de 0,6rph para todas as zonas

da habitação, independentemente de existir ou não ventilação natural. [49] Este objeto tem dois sistemas de ativação, o dos setpoints de temperatura e outro do horário mencionado anteriormente, sendo que este último prevalece em relação ao primeiro sistema. Assim, mesmo que as condições de temperatura de uma certa hora se encontrem dentro da gama definida, esta hora terá que estar dentro do horário em que se define uma certa abertura de janela.

## 7.9 Variáveis solicitadas ao EnergyPlus (Output Reporting)

Num primeiro estudo, uma vez que foi feita uma comparação entre os valores obtidos para o desempenho energético pelo REH e pelo E<sup>+</sup>, foi essencial analisar todos os dados referentes às trocas de energia que se processam através dos elementos que o delimitam. Assim, para além da solicitação das cargas de aquecimento e arrefecimento, foi indispensável a recolha de dados relativos a todos os ganhos e perdas relacionados com a envolvente opaca, envidraçados, renovação do ar e ganhos internos. Uma vez que alguns destes parâmetros não estavam disponíveis no objeto Output:Variables, foi necessário solicitá-los na secção Report. Assim, foram pedidas as seguintes variáveis:

*Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Energy*

*Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Energy*

*Zone Opaque Surface Inside Faces Total Conduction Heat Loss Energy*

*Zone Opaque Surface Inside Faces Total Conduction Heat Gain Energy*

*Surface Window Heat Loss Energy*

*Surface Window Heat Gain Energy*

*Zone Electric Equipment Total Heating Energy*

*Zone Lights Total Heating Energy*

*Zone People Total Heating Energy*

*Zone Infiltration Total Heat Gain Energy*

*Zone Infiltration Total Heat Loss Energy*

Numa segunda fase de trabalho, para além das variáveis relacionadas com as cargas de aquecimento e arrefecimento, foram solicitadas novas variáveis de forma a que se conseguisse analisar o comportamento da habitação em condições mais realísticas. Para auxiliar a escolha de valores de temperaturas em que o “sistema” de ventilação seria ligado ou desligado, foram solicitados os valores da temperatura exterior (*Site Outdoor Air Drybulb Temperature*) e de cada zona (*Zone Mean Air Temperature*) e posteriormente foram pedidos os valores que dizem respeito às renovações por hora em cada zona térmica (*Zone Ventilation Air Change Rate*) de forma a avaliar a sua ordem de grandeza. Para uma análise do conforto dentro da habitação, foi pedida a temperatura operativa em cada zona (*Zone Operative Temperature*), uma vez que para edifícios naturalmente ventilados, é utilizado o

modelo adaptativo que tem por base essa temperatura, como visto em 2.3. É importante referir que todas as variáveis descritas anteriormente foram solicitadas ao programa para todos os elementos e/ou zonas inseridos na modelação e para intervalos de uma hora. No primeiro estudo, as variáveis foram solicitadas para dois períodos (*Run Period*) diferentes (estação de aquecimento: 18 de Outubro a 10 de Abril; estação de arrefecimento: 11 de Abril a 17 de Outubro, tendo em conta que está incluída a meia estação, onde não é necessário aquecer ou arrefecer).



## Capítulo 8. Resultados e Análise das simulações

Neste capítulo, para além dos resultados das simulações e sua análise, será descrita a forma como os resultados dos dois modelos foram comparados entre si. Primeiramente será explicada a abordagem realizada para que os dois modelos tivessem uma mesma base, em termos climáticos, de comparação. Posteriormente serão mostrados e analisados os resultados relativamente ao comportamento térmico da habitação nas condições do regulamento e mais detalhadamente em condições mais realísticas.

### 8.1 Calibração dos dados climáticos nos modelos

É importante referir que para o método REH, as necessidades de energia são calculadas apenas uma vez, através do balanço entre as perdas e os ganhos térmicos totais da habitação para cada uma das estações. Por outro lado, o EnergyPlus considera todos os inputs definidos e avalia se é necessário aquecer/arrefecer a habitação através de uma análise da temperatura exterior, interior e de ativação do sistema *IdealLoads*. Por fim, são então calculadas as necessidades de energia a cada hora sendo efetuado o seu somatório para todas as horas definidas em cada estação, apresentando assim um procedimento de cálculo mais exaustivo e como tal mais preciso em relação ao REH. A comparação dos dois modelos exige que, pelo menos, se utilizem os mesmos dados climáticos, nomeadamente o número de graus-dias de aquecimento, temperaturas médias exteriores e radiação solar, caso contrário estar-se-ia a comparar resultados para diferentes climas. Quanto à duração das estações de aquecimento e arrefecimento, também se considerou as mesmas para ambos os métodos. A metodologia adotada para obter esta correspondência consiste em obter os dados referidos anteriormente através dos ficheiros climáticos do EnergyPlus e substituí-los nos cálculos da metodologia do REH. É, no entanto, importante referir que não se procura neste trabalho a igualdade de valores entre o EnergyPlus e o REH, mas sim tentar justificar, com base nos pressupostos adotados por cada um dos métodos, as diferenças entre os valores obtidos e concluir se, para habitações com estas especificidades, existe uma coerência de valores entre os métodos. Para além dos mesmos dados climáticos e duração das estações, foi estabelecido que algumas condições de utilização da habitação seriam as mesmas para ambos os métodos como os limites de temperatura de conforto (18-25°C), o número de renovações por hora em cada zona (0,6rph no verão e 0,4rph no inverno) e os ganhos internos (4W/m<sup>2</sup>). Para se considerarem estes ganhos internos, foi definido no objeto *ElectricEquipment* um valor de 4W por cada m<sup>2</sup> em cada zona, para todas as horas do ano.

#### 8.2.1 Comparação do modelo de inverno

##### 8.1.1.1 Duração da estação de aquecimento

A duração da estação de aquecimento depende do clima e da metodologia empregada. Assim, para o método de base sazonal, REH, a duração da estação é um valor constante que depende da localização

do edifício e que está definido no Despacho n.º 15793-F/2013. Por outro lado, para o método horário, a duração da estação varia consoante a localidade e, conseqüentemente, com o ficheiro climático utilizado. Assim, essas datas são determinadas tendo em consideração que a estação tem início no primeiro decêndio após 1 de Outubro em que a temperatura média diária não ultrapassa os 15°C e dura até aos últimos 10 dias consecutivos nas mesmas condições, anteriores a 31 de Maio. Desta forma, a estação de aquecimento, para o caso em estudo, tem início no dia 18 de Outubro e termina no dia 10 de Abril. Quanto à duração da estação de arrefecimento no método sazonal, esta toma sempre o mesmo valor, independentemente do local do edifício. Quanto ao método horário, uma vez que não se conhece nenhum procedimento para o obter, foi assumido o mesmo valor do método sazonal (2928 horas).

Tabela 8.1 - Duração das estações de aquecimento e arrefecimento dos métodos utilizados

Método	Duração estação aquecimento [horas]	Duração estação arrefecimento [horas]
REH	4026	2928
EnergyPlus	4201	2928

Pela tabela 8.1 conclui-se que a duração da estação de aquecimento é semelhante para ambos os métodos, no entanto, para o procedimento que utiliza os dados horários, o resultado é mais preciso uma vez que não é assumido um valor médio da duração para cada clima. Assim, o valor da duração da estação de aquecimento foi substituído nos cálculos do REH e o da estação de arrefecimento substituído no programa.

#### 8.1.1.2 Dados climáticos

Tal como a duração da estação de aquecimento e arrefecimento, os dados climáticos dependem da região climática e da metodologia que se emprega. O método de cálculo sazonal dispõe de dados climáticos tabelados no Despacho n.º15793-F/2013 que dependem da zona onde se encontra o edifício (Zonamento Climático NUTS III). Por outro lado, a simulação através do EnergyPlus utiliza dados climáticos horários providenciados pelo LNEG. Desta forma foram obtidos os valores da temperatura média exterior no Verão e Inverno, o número de graus dias de aquecimento e os valores relativos à radiação solar.

##### • Temperatura exterior e graus dias de aquecimento

Para se obter a temperatura média exterior de cada estação, foram retirados os valores das temperaturas médias desses meses (considerando a duração considerada anteriormente) a partir do output *Site Outdoor Air Drybulb Temperature* do EnergyPlus. Por sua vez, como se pretende utilizar o valor de graus dias obtido através dos dados climáticos horários nos cálculos do regulamento, foi necessário determiná-lo visto que o software não permite a leitura direta do mesmo. Este parâmetro,

que depende da região climática onde se situa o edifício, é um dos parâmetros que caracteriza a severidade do clima para a estação de aquecimento. Assim, a expressão utilizada para a sua determinação é representada pela equação 8.1, obtida através do somatório das diferenças de temperatura, quando a temperatura exterior se encontra abaixo de uma temperatura de referência (18°C), a dividir pelas 24 horas de um dia.

$$GD = \frac{\sum(T_{int,ref} - T_{ext})^+}{24} \quad \text{Equação 8.1}$$

Tabela 8.2 - Valores de temperatura média exterior e graus-dias obtidos pelos dois métodos de simulação

Método	T <sub>média exterior, inverno</sub> (°C)	GD (°C. dia)
REH	11,0	1168
EnergyPlus	12,4	1218

- **Radiação solar incidente**

Tal como os parâmetros tratados anteriormente, a radiação solar incidente também é dependente da região climática onde se localiza o edifício e da metodologia que se pretende utilizar. Assim, no método de base sazonal, estes valores são tabelados para cada zona climática e estão presentes no Despacho n° 15793-F/2013, sendo que os valores de radiação incidente em cada superfície são obtidos através de um fator de ponderação, relativamente à radiação incidente numa superfície vertical orientada a Sul. Por outro lado, através do EnergyPlus é possível obter-se os valores relativos à radiação solar incidente em cada orientação, através do output *Surface Outside Face Incident Solar Radiation Rate* [W/m<sup>2</sup>]. Desta forma foi possível calcular os ganhos solares multiplicando o valor da área efetiva coletora de cada envidraçado (calculado pela ferramenta), pela radiação incidente em cada orientação obtida, pelo output mencionado anteriormente.

### 8.2.1 Comparação do modelo de Verão

Uma vez que, no modelo REH, os valores das perdas através da envolvente estão diretamente relacionadas com a temperatura média exterior, o valor deverá ser o mesmo em ambos os métodos. Assim, optou-se por considerar em ambos os cálculos o valor da temperatura média obtida através do EnergyPlus, para o período de Verão considerado, sendo esta de 20,5°C, valor próximo do considerado pelo REH (21,1°C). Um outro parâmetro que é necessário calibrar diz respeito ao valor da energia acumulada para cada orientação, uma vez que os ganhos pelos envidraçados no modelo REH dependem dele. Assim, através do mesmo output mencionado anteriormente, foi possível obter-se, para cada orientação, a energia total acumulada durante a estação de arrefecimento, tendo sido posteriormente substituídos pelos valores utilizados na folha de cálculo.

Tabela 8.3 - Valores de energia acumulada na estação de arrefecimento obtidos pelos dois métodos de simulação

	$I_{sol}$ (kWh/m <sup>2</sup> acumulados na estação de arrefecimento)			
	Sul	Norte	Este	Oeste
<b>REH</b>	410	225	500	500
<b>EnergyPlus</b>	389	237	565	464

## 8.2 REH vs EnergyPlus - Resultados

Uma vez feita a correção dos dados climáticos entre os modelos, foram realizados todos os cálculos e simulações necessárias de forma a se obterem os valores das cargas de aquecimento e arrefecimento. Como já dito anteriormente, foram estabelecidas algumas condições no programa de forma a estar coerente com o regulamento, como o limite de temperatura de conforto (18-25°C), o número de renovações por hora em cada zona (0,6RPH no verão e 0,4RPH no inverno) e os ganhos internos (4W/m<sup>2</sup>). Uma vez que se pretende analisar as duas estações em separado, o *RunPeriod* para cada simulação correspondeu à duração de cada estação, e para cada uma foi ativado apenas o setpoint de arrefecimento (Verão) ou aquecimento (Inverno).

Tabela 8.4 - Valores das cargas obtidas através dos dois métodos de cálculo.

	<b>REH</b>	<b>REH (com dados climáticos E+)</b>	<b>EnergyPlus (E+)</b>
<b>Carga Arrefecimento</b> [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	6,9	5,7	9,0
<b>Carga Aquecimento</b> [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	18,6	21,1	3,8

Na tabela 8.4 estão representados os valores obtidos através da simulação estática (REH) e dinâmica (EnergyPlus) das cargas de arrefecimento e aquecimento, respetivamente. A primeira coluna diz respeito aos valores retirados diretamente da folha de cálculo, a segunda coluna também diz respeito a esses valores, mas calculados tendo por base as alterações feitas aos parâmetros climáticos descritos anteriormente, e a terceira coluna corresponde aos valores obtidos através de simulação em EnergyPlus. Observando os resultados obtidos, pode-se concluir que, apesar de se terem utilizado os mesmos dados climáticos nos dois modelos, existe uma discrepância de valores (segunda e terceira coluna), sendo esta mais acentuada na carga de aquecimento. Este resultado era esperado uma vez, como já explicado anteriormente, cada método executa o balanço térmico da habitação de forma diferente. Assim, de forma a tentar perceber as diferenças observadas, foram retirados todos os dados relevantes para esse efeito, como os ganhos e perdas térmicas registadas nos dois métodos, sendo que

no REH foi apenas necessário retirar os valores da folha de cálculo, e no programa foi necessário analisar cada output de forma a contabilizar um total para o número de horas pretendido (Verão ou Inverno).

### 8.2.1 Estação de aquecimento

Na figura 8.1 estão representados os ganhos e perdas associados aos dois métodos de simulação energética. A primeira coluna (azul escuro) representa os ganhos/perdas calculados através do programa EnergyPlus. A segunda coluna (vermelho) diz respeito a esses mesmos valores, mas obtidos através da folha do cálculo simplificado, onde os valores de ganhos térmicos já estão multiplicados pelo fator de utilização de ganhos recalculado a partir dos novos valores de ganhos e perdas. Finalmente, a terceira coluna (azul claro) representa os ganhos brutos retirados também da mesma folha de cálculo.

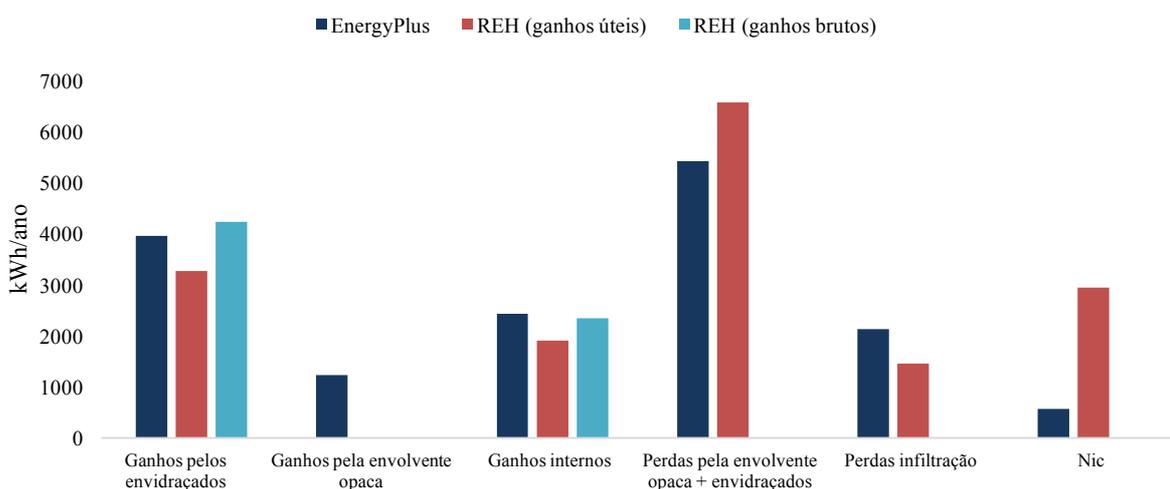


Figura 8.1 - Comparação dos valores do REH e EnergyPlus (Inverno).

Como visto anteriormente, os ganhos térmicos brutos calculados pelo regulamento são multiplicados por um fator de utilização de ganhos, fator este que depende desses mesmos ganhos, das perdas e do coeficiente de inércia da habitação. Assim, a carga de aquecimento é calculada através do balanço  $Carga\ aquecimento = Ganhos\ térmicos\ úteis - Perdas\ térmicas$ . Por outro lado, observando a equação 4.11 que representa como o EnergyPlus executa o balanço térmico, pode-se concluir que este o executa de uma forma totalmente distinta, sendo que uma comparação direta entre as metodologias de cálculo não é viável e por essa razão foram apenas comparados os valores de ganhos (brutos) e perdas de cada método e justificadas as diferenças observadas, considerando que os valores de ganhos térmicos retirados através dos outputs do programa são brutos.

Pode-se assim concluir que o regulamento, para este tipo de habitações, é prejudicial na análise da carga de aquecimento, fazendo com que esta seja sobredimensionada.

### 8.2.1.1 Diferença entre os valores de ganhos

- Envidraçados

Apesar de se terem utilizado os mesmos dados referentes à intensidade da radiação solar em cada orientação, os ganhos solares brutos apresentam uma pequena discrepância entre os dois métodos. Esta discrepância pode ser explicada pelo facto de que o REH utilizar os valores de radiação solar incidente médios durante a estação de aquecimento e, por outro lado, o EnergyPlus considerar a variação da intensidade e da incidência a cada hora.

- Envolvente opaca

Através da folha de cálculo do método sazonal, é possível observar que, para a estação de aquecimento, apesar de se ter em consideração o impacto da radiação solar nos vãos envidraçados, não existe qualquer valor associado aos ganhos solares através da envolvente opaca, o que pode justificar parte da discrepância do valor das necessidades de aquecimento. Assim, decidiu-se analisar qual o contributo dessa radiação no balanço de energia realizado pelo EnergyPlus e, posteriormente, adicioná-la ao balanço energético do método REH (terceira coluna da tabela). É importante notar que a contabilização deste valor foi feita de forma manual, considerando que o valor do regulamento será igual ao do programa. Foi feita esta aproximação apenas para analisar a influência deste parâmetro no balanço energético do edifício. Pode-se confirmar que o resultado da carga de aquecimento é efetivamente diferente, passando para uma pouco mais de metade (de 21,1 kWh/m<sup>2</sup>.ano para 14,5 kWh/m<sup>2</sup>.ano), podendo-se concluir que os ganhos solares através da envolvente opaca têm um forte contributo na diminuição da carga de aquecimento.

### 8.2.1.2 Diferenças entre os valores de perdas

- Envolvente opaca e envidraçados

As perdas através dos vãos envidraçados e envolvente opaca no método REH são superiores às calculadas pelo E<sup>+</sup>. Este facto pode ser atribuído à influência da inércia térmica dos elementos da envolvente que causam atrasos na transferência de calor, pelo que em partes do dia essas podem ainda estar a contribuir para um ganho térmico para períodos em que temperatura ar exterior seja inferior à do ar interior. Esta diferença também pode ser explicada pelo facto de, no regulamento, a caracterização dos envidraçados ser feita com base no coeficiente de transmissão térmica enquanto que na simulação os vãos envidraçados sejam definidos de uma forma mais detalhada.

- Renovação do ar

Quanto às perdas térmicas associadas à renovação do ar interior, estas apresentam uma discrepância entre os dois métodos, podendo ser explicada pelo facto de que o regulamento adota um valor constante para o número de renovações horárias. Pelo contrário o E<sup>+</sup> calcula a renovação de ar tendo

em conta um conjunto de variáveis como a diferença de temperatura entre o exterior e interior e a velocidade do vento a cada hora.

### 8.2.2 Estação de arrefecimento

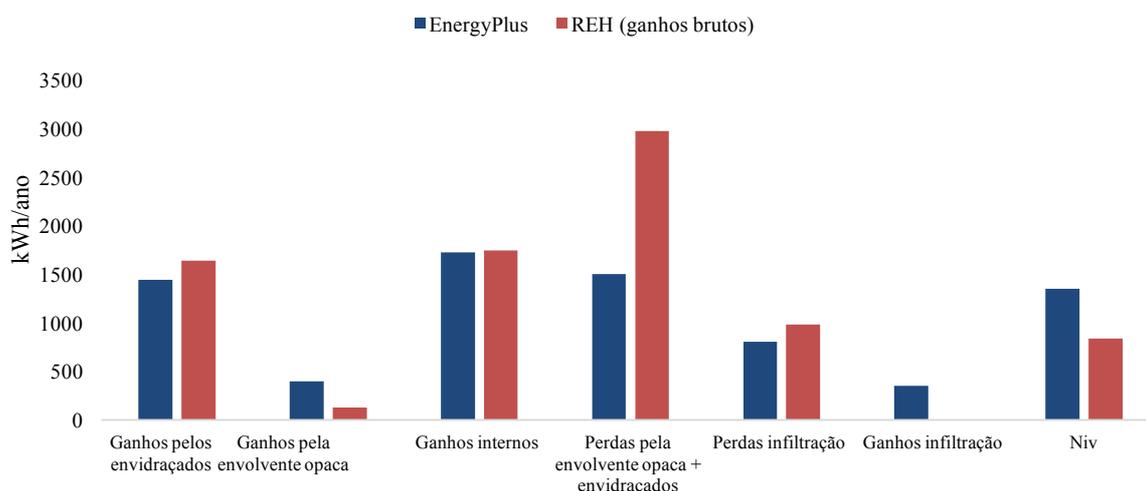


Figura 8.2 - Comparação dos valores do REH e EnergyPlus (Verão).

Para a estação de arrefecimento, como já visto anteriormente, o regulamento calcula a carga através de  $Carga = (1 - \eta) \times \text{Ganhos térmicos brutos}$ , sendo  $\eta$  o fator de utilização de ganhos. Mais uma vez, o balanço térmico é realizado de forma distinta entre os dois métodos, sendo que novamente apenas se tentou justificar as diferenças entre os ganhos (brutos) e perdas.

Quanto aos ganhos solares, podem-se observar algumas discrepâncias entre os valores obtidos para cada método. No EnergyPlus os dispositivos de sombreamento interiores são ativados de acordo com a imposição feita pelo utilizador (neste caso, ativam-se sempre que a temperatura dentro da zona é superior a 22°C). Por outro lado, no regulamento, o ativamente dos dispositivos de sombreamento é um valor tabelado. Para além deste facto, o regulamento utiliza os dados médios de radiação acumulada durante a duração da estação para cada orientação, enquanto que o programa utiliza os mesmos dados, mas numa base de tempo horária.

No que toca às perdas, estas são significativamente maiores no regulamento, uma vez que para além de este minimizar a capacidade dos elementos da envolvente absorverem e reterem a energia, as fórmulas empregadas (equação 4.9 e 4.10) utilizam uma diferença entre a temperatura de referência (25°C) e um valor fixo de temperatura média exterior, enquanto que o EnergyPlus contabiliza as diferenças hora a hora.

## 8.3 Comportamento térmico da habitação em condições reais

Numa segunda fase de trabalho foi analisado o comportamento térmico da habitação em condições distintas das assumidas no Regulamento, com perfis de utilização standard descritos no Capítulo 7. Os ganhos internos passaram a ter contribuição dos equipamentos elétricos, iluminação e ocupantes, para além de que se ativou (quando for mencionado) a ventilação natural. As condições foram impostas para toda a habitação e foram realizadas simulações para todas as horas do ano e, posteriormente, para cada estação (Inverno e Verão). Quanto à gama de temperatura de conforto, esta passou de 18°C-25°C para 20-25°C.

### **8.3.1 Anual**

A temperatura operativa média diária das zonas ocupadas da habitação (sala, cozinha e quartos) em regime free-floating, ou seja, apenas com infiltração, pode ser observada nas figuras 8.3, 8.4 e 8.5, respetivamente. De forma a ter-se uma noção da influência dos sombreamentos, é mostrado o perfil de temperaturas sem qualquer tipo de sombreamento na habitação e com sombreamento permanente (pelas exteriores) e móvel (cortinas interiores), sendo este controlado como mencionado em 7.3. Pode-se concluir que, no Inverno, a ação destes dispositivos permite uma diminuição da temperatura operativa das zonas, sem que, no entanto, esta nunca seja inferior a 19°C na cozinha e 17°C na sala e quartos durante todo o ano, reduzindo, assim, o sobreaquecimento durante ambas as estações.

De acordo com [28], estudos mostraram que os edifícios com isolamento de fardos de palha são muito sensíveis aos ganhos solares e apenas uma boa gestão dos dispositivos de sombreamento reduz as situações de desconforto dos ocupantes. Assim, para além da informação dada aos ocupantes acerca desta sensibilidade, um “timing” adequado da ativação das persianas permite um aumento do conforto no Verão uma vez que a temperatura interior pode ser reduzida em 2°C sem o recurso a dispositivos de climatização.

A partir das mesmas figuras, pode-se verificar que, no Verão, os sombreamentos reduzem substancialmente, em todas as zonas estudadas, as horas em que a temperatura operativa é superior a 25°C, reduzindo até 5°C a temperatura do ar interior, uma vez que desta forma são evitados ganhos excessivos nos meses mais quentes e nos dias de maior incidência solar, permitindo assim um aumento do conforto térmico na habitação e uma redução na carga de arrefecimento. Pode-se concluir que, apesar da carga de aquecimento aumentar ligeiramente por consequência da diminuição da temperatura no Inverno, a redução da carga de arrefecimento no Verão é bastante mais significativa, sendo que a habitação em regime free-floating e com os devidos dispositivos de sombreamento, não tem uma elevada amplitude térmica, sendo esta de 9°C para a cozinha e de 11°C para a sala e quartos.

Desempenho térmico de edifícios com materiais de reduzida energia incorporada – caso de estudo de um sistema construtivo modular pré-fabricado

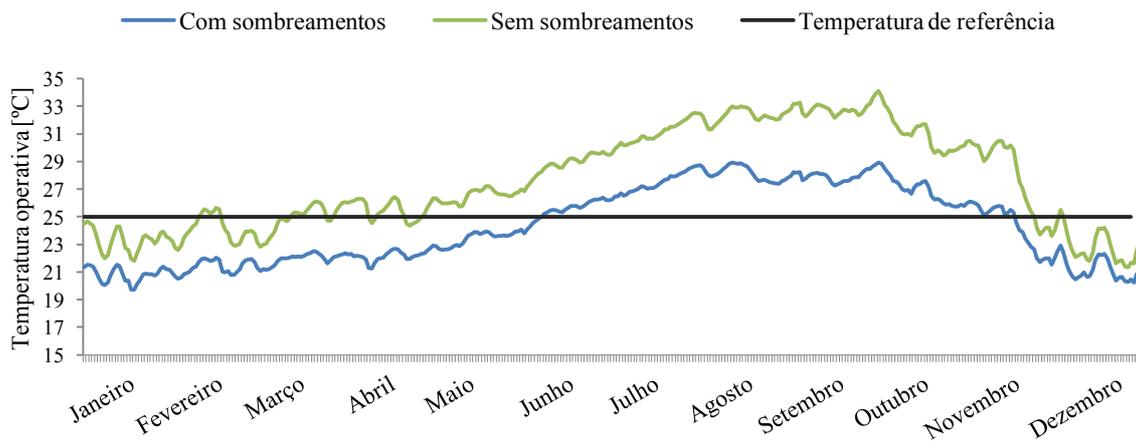


Figura 8.3 - Temperatura operativa da cozinha com e sem os dispositivos de sombreamento

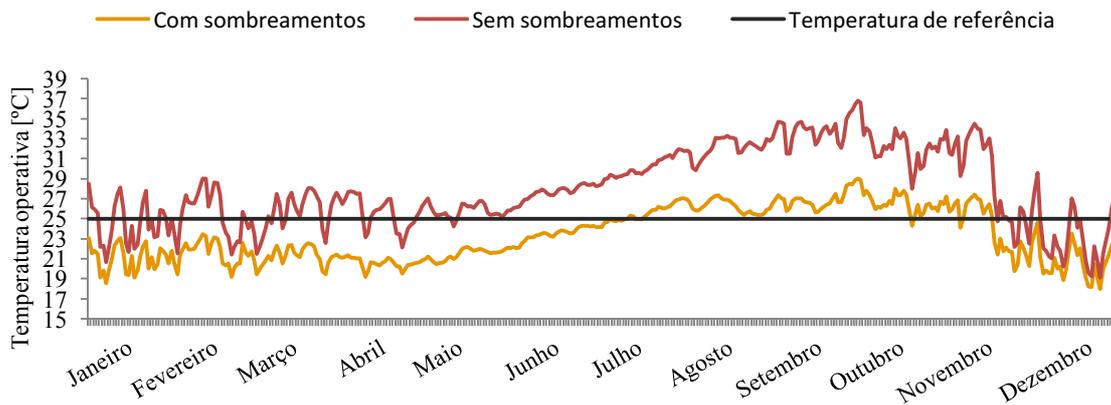


Figura 8.4 - Temperatura operativa da sala com e sem os dispositivos de sombreamento

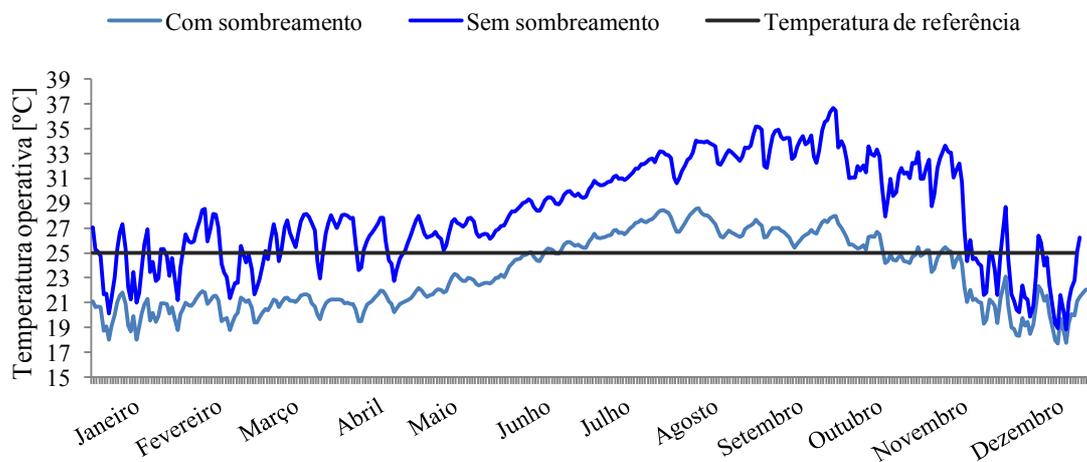


Figura 8.5 - Temperatura operativa dos quartos com e sem os dispositivos de sombreamento.

Comparando o perfil de temperaturas nos meses de Inverno (Novembro-Março) no interior da cozinha com as da sala e quartos, pode-se observar que este é mais homogéneo uma vez que esta zona está localizada na parte Norte da habitação e, por isso, não recebe radiação direta durante estes meses. Por outro lado, as temperaturas da sala e quartos registam um perfil que, como se pode observar pelas figuras 8.6 e 8.7, vai de encontro ao perfil da radiação transmitida através dos envidraçados no Inverno. A partir da mesma figura pode-se também confirmar o que foi dito em 4.3, observando-se uma maior transmissão de radiação nos meses de Inverno quando comparado com o Verão, para a fachada virada a Sul, devido ao facto de o ângulo de incidência dos raios solares ser menor. Aliado a esse facto, a radiação transmitida é reduzida substancialmente no Verão, através da ação de dispositivos de sombreamento permanentes (palas) e móveis (cortinas interiores) que reduzem a radiação solar que atravessa os vãos envidraçados.

O facto da escala de radiação transmitida através dos envidraçados para a sala ser superior à registada nos quartos, deve-se apenas ao facto da zona ter uma área de janelas mais elevada. Uma vez que os quartos apresentam valores semelhantes tanto de temperatura como de radiação, optou-se por fazer-se uma média dos valores para a sua representação gráfica.

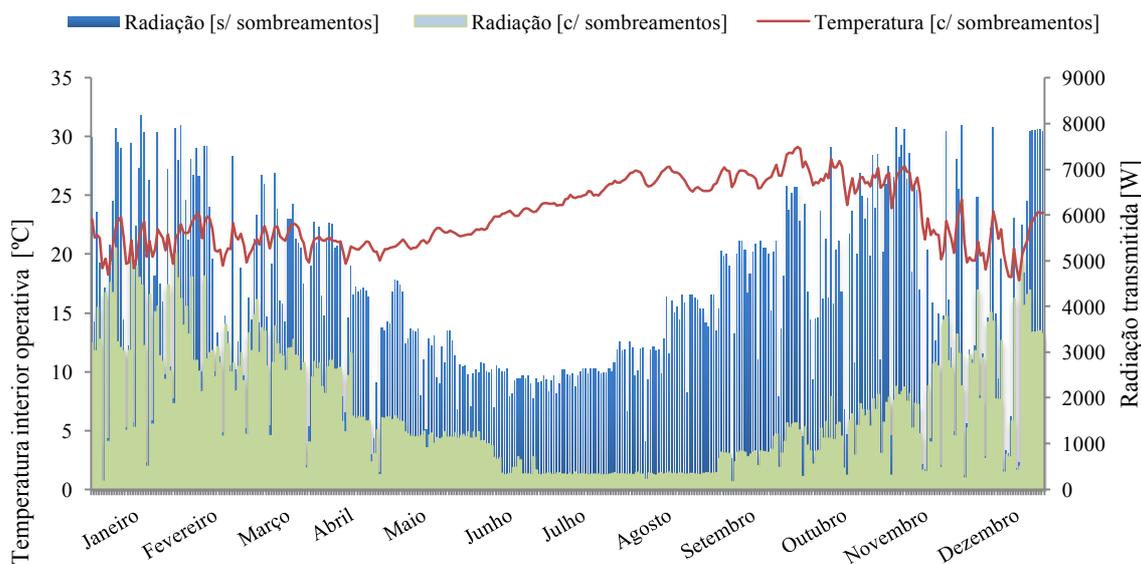


Figura 8.6 - Valores de radiação transmitida para a sala com e sem dispositivos de sombreamento

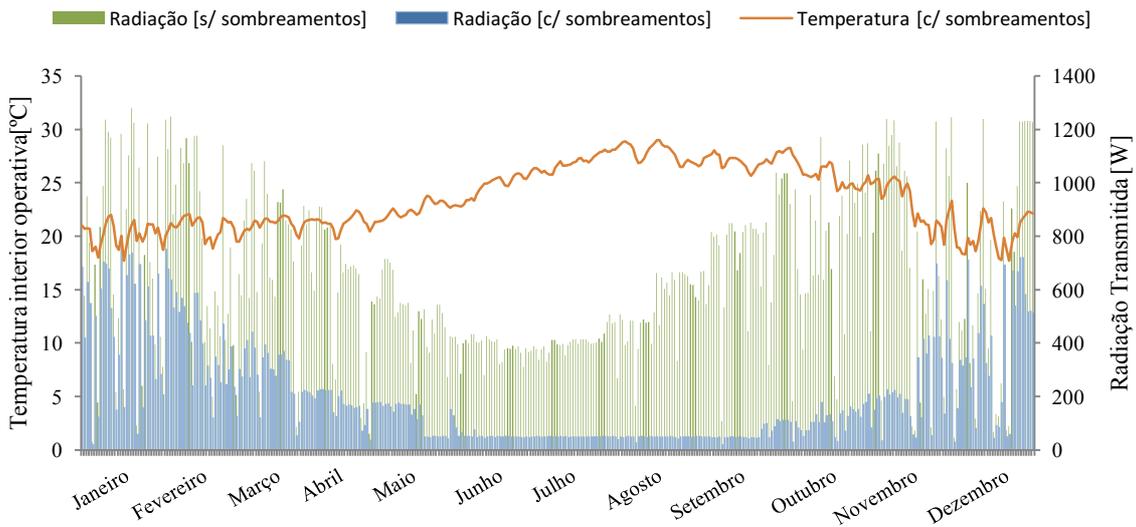


Figura 8.7 - Valores de radiação transmitida para os quartos com e sem dispositivos de sombreamento

Admitindo um período de simulação anual e com todos os dispositivos de sombreamento acionados (permanentes e móveis sempre que acionados), pode-se concluir pelo histograma da figura 8.8 que a habitação apresenta, em condições free-floating, uma percentagem de cerca de 50% de horas em que a temperatura operativa está entre 20 e 25°C, concluindo-se que em grande parte do tempo existe conforto térmico. Pode-se também observar que não existe qualquer hora no ano, nas zonas estudadas, em que a temperatura seja inferior a 15°C e que existe uma pequena percentagem de horas na cozinha e sala em que a temperatura excede os 30°C. Estes resultados vão ao encontro do referido em [28] que refere que a maioria dos edifícios construídos com fardos de palha têm problemas de sobreaquecimento, confirmando-se que o facto de não existir efeito de inércia na parede exterior, pode ser compensado pela adição de uma parede no meio da habitação, como foi referido em 4.6.1. Assim, [28] refere que a adição de uma parede de adobe no meio da habitação e uma laje de betão no pavimento térreo e primeiro andar, faz com que a inércia do edifício seja classificada como média, o que significa que a parede de adobe tem uma grande influência uma vez que representa 28% do total de capacidade de calor do edifício, fazendo com que a carga de aquecimento diminua no Inverno e diminuindo a diferença entre a temperatura interior e exterior em 0,5°C (para temperaturas elevadas).

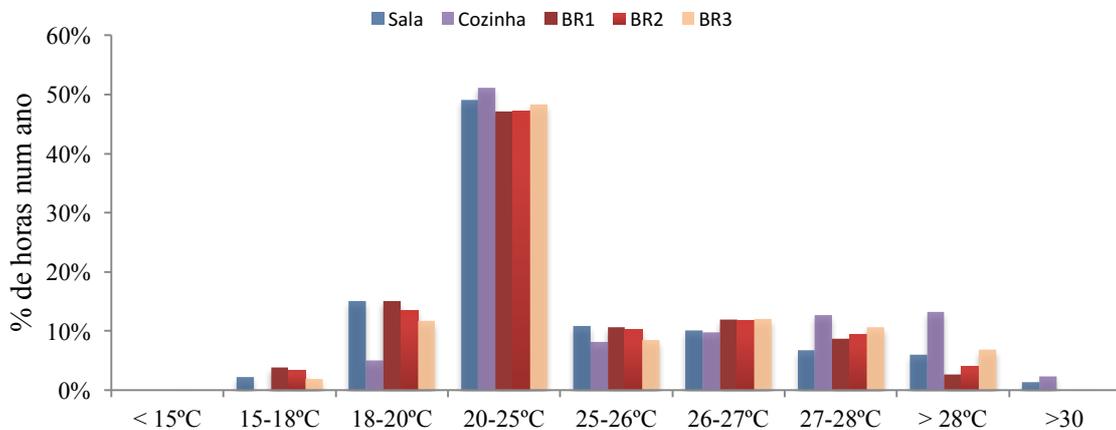


Figura 8.8 - Histograma de temperaturas da habitação em regime free-floating

Posteriormente ao estudo feito para a habitação em condições free-floating, foi acrescentada a ventilação natural ao modelo com os devidos dispositivos de sombreamento. Como explicado no subcapítulo 8.8, foi necessário realizar várias simulações até que se conseguisse encontrar um valor otimizado para os limites de temperatura interior e exterior para as quais o sistema de ventilação natural fosse ativado. Desta forma, considerou-se como condição ótima aquela em que se registasse, em cada zona, o menor número de horas com temperaturas interiores fora do limite de conforto (20-25°C), mas que também não fizesse o número de renovações por hora ultrapassar certo valor, sendo esta a primeira regra a ser respeitada. Assim, esse número de horas foi otimizado para cada zona, e as figuras 8.9, 8.11 e 8.13 mostram a temperatura operativa média de cada uma em regime de free-floating com ventilação natural. Quanto ao o número máximo de renovações de hora em cada zona para cada dia do ano, este pode ser observado através das figuras 8.10, 8.12 e 8.14.

Pode-se observar que, em todas as zonas, o número de horas com temperatura acima de 25°C reduziu, sem que, no entanto, o número máximo de renovações por hora ultrapassasse certo valor, pois o excesso de movimento de ar poderia causar um desconforto indesejado. Como já dito anteriormente, a ventilação das habitações deve ser geral e permanente, mesmo nos períodos em que a temperatura exterior obriga a manter as janelas fechadas. Assim, apesar de se observar que no período de Inverno não existe praticamente entrada de ar, existe sempre um caudal de infiltração assegurado, que não é mostrado através deste output.

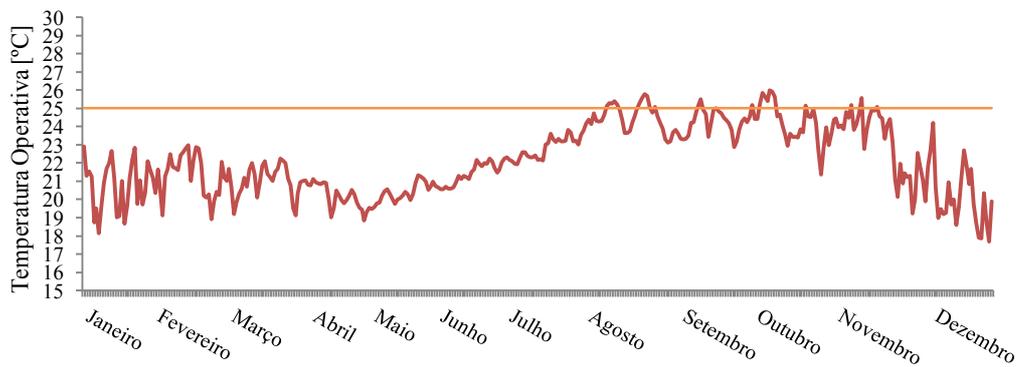


Figura 8.9 - Perfil da temperatura operativa da sala em regime de ventilação natural

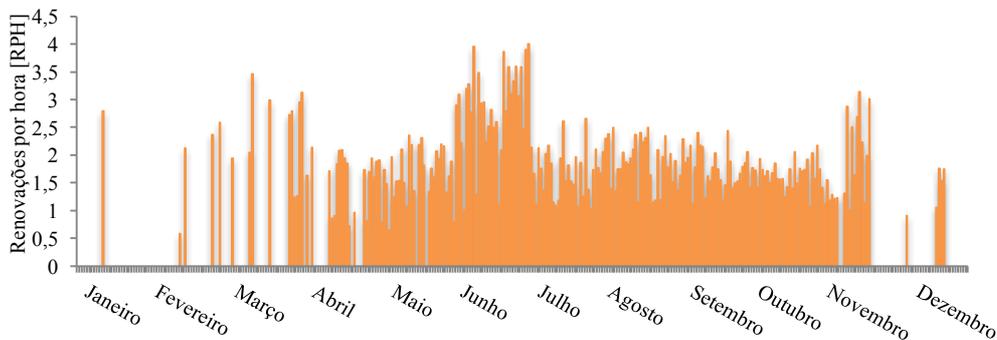


Figura 8.10 - Taxa de renovação do ar dentro da sala

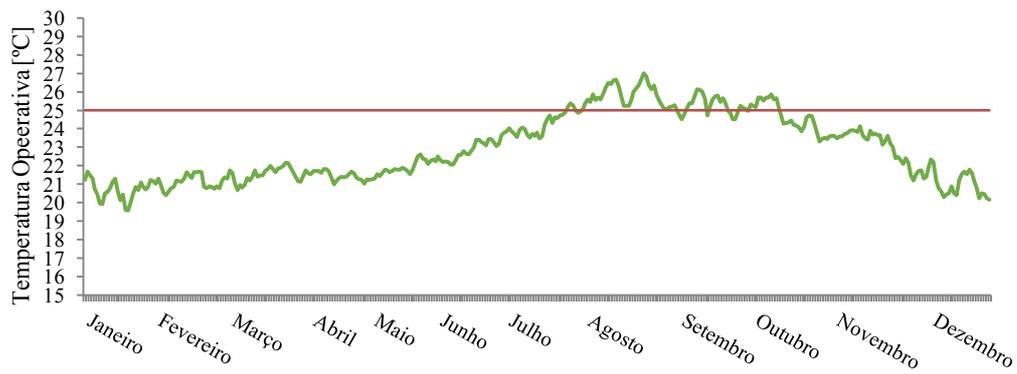


Figura 8.11 - Perfil da temperatura operativa da cozinha em regime de ventilação natural

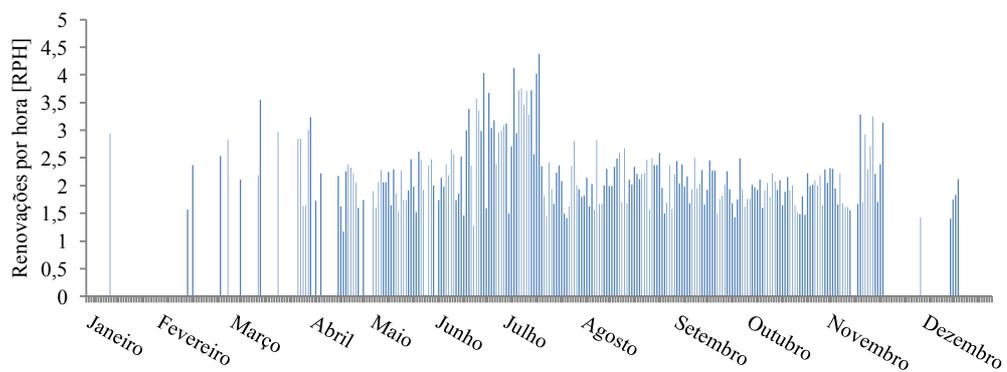


Figura 8.12 - Taxa de renovação do ar dentro da cozinha

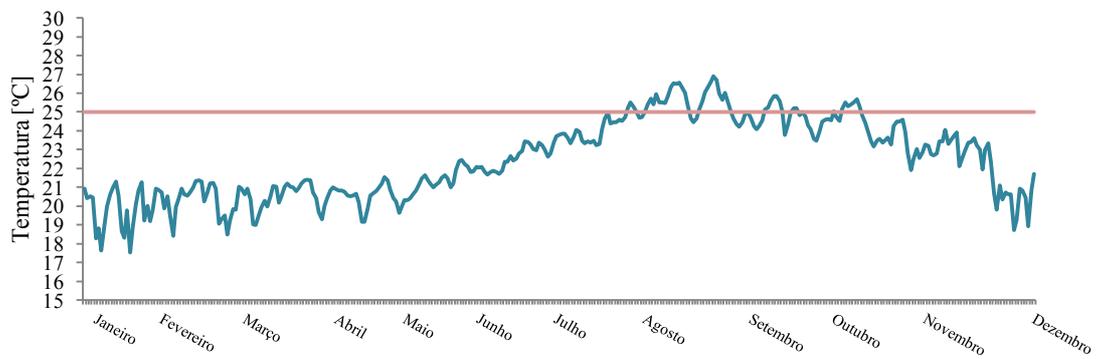


Figura 8.13 - Perfil da temperatura operativa dos quartos (média) em regime de ventilação natural

## Desempenho térmico de edifícios com materiais de reduzida energia incorporada – caso de estudo de um sistema construtivo modular pré-fabricado

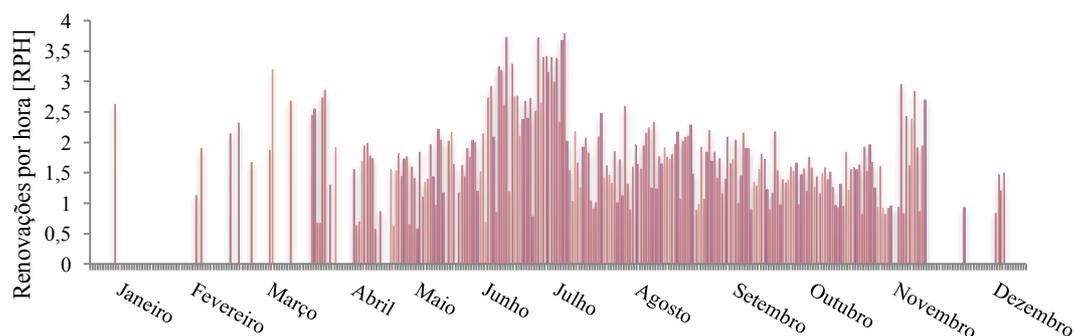


Figura 8.14 - Taxa de renovação do ar dentro dos quartos (média)

Analisando novamente o histograma das temperaturas operativas, é possível observar que o número de horas em que esta é inferior a 20°C teve um aumento de 4% na sala, 4,5% na cozinha e entre 16,9%-19,7% nos quartos. Quanto às horas com temperatura superior a 25°C a redução foi bastante mais acentuada, verificando-se diminuições entre 1791 e 2343 horas, podendo-se concluir que a ventilação natural tem uma forte contribuição na redução das horas com temperaturas superiores a 25°C e, conseqüentemente, na redução da carga de arrefecimento.

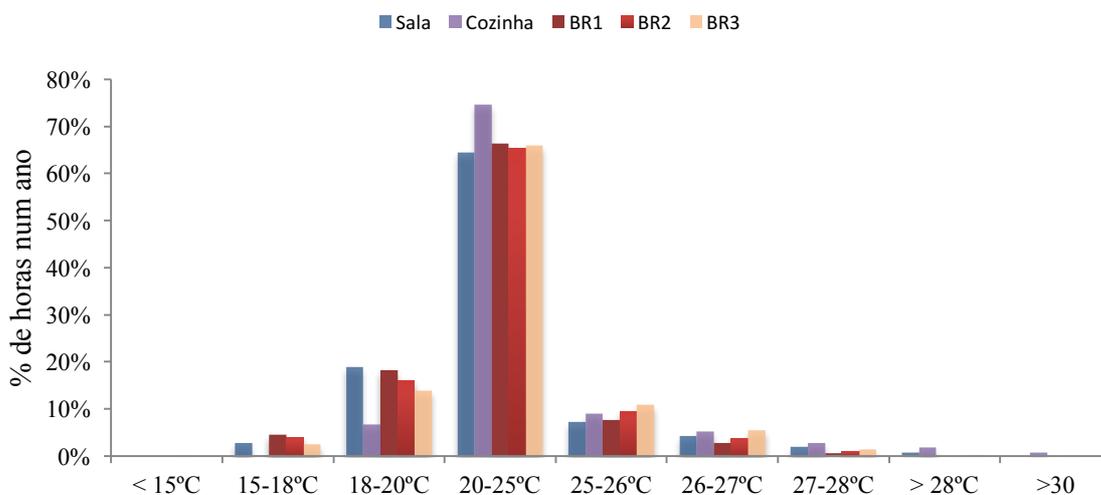


Figura 8.15 - Histograma de temperaturas da habitação em regime de ventilação natural

Posteriormente foi adicionado ao modelo o objeto *IdealLoads* de forma a obterem-se valores referentes à carga de aquecimento e arrefecimento. Como já explicado em 7.8, uma vez que se pretende que a simulação seja o mais próximo da realidade possível, considerou-se que o sistema AVAC não poderia estar a funcionar em simultâneo ao sistema de ventilação natural. Efetuaram-se novas simulações de forma a estabelecer os parâmetros que determinam a ativação do sistema de ventilação de forma a não arrefecer a casa e, conseqüentemente, não ativar o sistema AVAC para aquecimento. Desta forma, considerou-se como condição ótima aquela em que o número de horas em que os dois sistemas funcionassem em simultâneo fosse o mais baixo possível. Posteriormente, foi

retirado o sistema de ventilação natural de forma perceber-se qual a sua influência nas cargas, podendo-se confirmar o que já tinha sido dito anteriormente. Os resultados apresentados na tabela 8.5 são relativos ao ano inteiro, em que as duas primeiras filas dizem respeito às cargas para todas as horas do ano, e a terceira apenas para o período de ocupação. Comparando as cargas de arrefecimento e aquecimento com o sistema de ventilação ativo, pode-se concluir que existe uma redução de 5,1 kWh/m<sup>2</sup>.ano na de arrefecimento e um aumento pouco significativo na de aquecimento, o que vai de encontro ao analisado anteriormente. Quanto aos resultados referentes apenas ao período de ocupação, pode-se verificar que existe, como seria de esperar, uma redução significativa das cargas, uma vez que a habitação está, na maior parte do tempo, desocupada. No entanto, há que ter em atenção que as cargas são muito influenciadas pelos horários aplicados e pela taxa de ocupação das zonas, e estes pressupostos são apenas um exemplo do que poderia acontecer na realidade.

Tabela 8.5 - Valores de cargas de aquecimento e arrefecimento anuais obtidos por simulação em EnergyPlus

	<b>Carga aquecimento [kWh/m<sup>2</sup>.ano]</b>	<b>Carga arrefecimento [kWh/m<sup>2</sup>.ano]</b>
<b>Apenas IdealLoads</b>	7,4	16,0
<b>IdealLoads + Ventilação Natural</b>	7,6	10,9
<b>IdealLoads + Ventilação Natural para período de ocupação</b>	1,6	4,2

De seguida é realizada uma análise referente sobreaquecimento nas duas estações em separado, admitindo uma duração de 4201 horas para a estação de aquecimento e as restantes horas do ano para a estação de arrefecimento.

### 8.3.2 Estação de Arrefecimento

A partir do histograma da figura 8.16 é possível observar que a percentagem de horas no Verão em regime free-floating em que a temperatura se situa entre os 26°C e os 28°C é superior ao cenário onde existe ventilação natural (figura 8.17), confirmando o grande efeito de redução de carga de arrefecimento causado por este mecanismo.

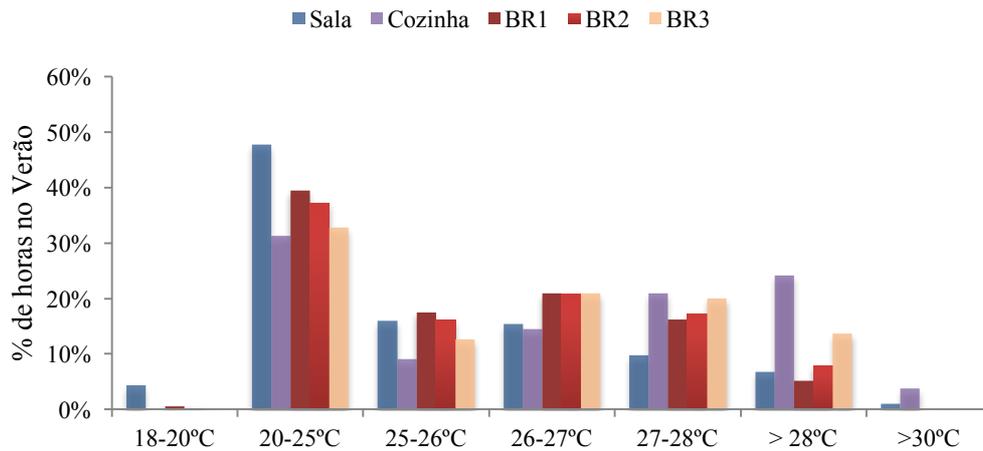


Figura 8.16 - Histograma de temperaturas na estação de arrefecimento - regime free-floating.

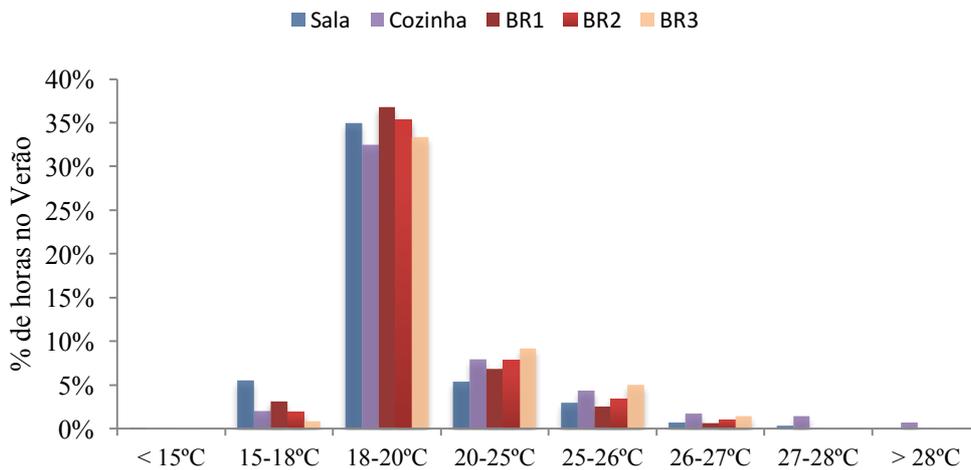


Figura 8.17 - Histograma de temperaturas na estação de arrefecimento - regime com ventilação natural.

De acordo com [50], um critério para avaliar se existe sobreaquecimento é a percentagem de horas em que a temperatura operativa da zona está acima de 28°C, que não deve, no entanto, ser superior a 1% do total de horas em que a zona está ocupada. Uma análise alternativa trata a diferença entre a temperatura operativa e a temperatura de referência (25°C), em que 99% das diferenças tem que ser inferior a 3°C. No entanto, estudos acerca do conforto adaptativo mostram que as pessoas são capazes de demonstrar satisfação mesmo com temperaturas acima de 28°C, especialmente em dias onde a temperatura média exterior excede os 20°C. A tabela 8.6 mostra os resultados obtidos para um regime em free-floating, ou seja, sem sistema AVAC ou ventilação natural. Quanto à tabela 8.7, esta mostra os mesmos resultados, mas para um regime onde existe ventilação natural.

Desempenho térmico de edifícios com materiais de reduzida energia incorporada – caso de estudo de um sistema construtivo modular pré-fabricado

Tabela 8.6 - Percentagem de horas, dentro do horário de ocupação, com temperatura superior a 28°C (regime free-floating sem ventilação natural)

Zona	Nº de horas com ocupação	Nº de horas >28	Nº de horas >28°C dentro do horário de ocupação	% do total de horas
Sala	537	297	59	10,9
Cozinha	1202	1196	538	44,7
BR1	1611	226	45	2,7
BR2	1611	343	74	4,5
BR3	1340	597	158	11,7

Tabela 8.7 - Percentagem de horas, dentro do horário de ocupação, com temperatura superior a 28°C (regime free-floating com ventilação natural)

Zona	Nº de horas com ocupação	Nº de horas >28	Nº de horas >28°C dentro do horário de ocupação	% do total de horas
Sala	537	28	0	0
Cozinha	1202	122	12	0,9
BR1	1611	0	0	0
BR2	1611	0	0	0
BR3	1340	0	0	0

Pode-se concluir que apenas se considera que não existe sobreaquecimento no Verão quando a habitação usufrui de sistema de ventilação natural, uma vez que em regime livre, a percentagem de horas em que a temperatura operativa excede os 28°C é sempre superior a 1% das horas em que a zona está ocupada. Analisando o percentil 99 para cada zona (ocupada) em regime de ventilação natural, verifica-se que a diferença entre a temperatura operativa e a de referência nunca é superior a 3°C, como se pode observar na tabela seguinte:

Tabela 8.8 - Percentil 99 da diferença entre a temperatura operativa e a de referência para cada zona no horário de ocupação

[°C]	Sala	Cozinha	Quarto1	Quarto 2	Quarto 3
<b>Percentil 99</b>	1,4	2,5	1,0	1,1	1,6

Como já dito anteriormente, o valor das cargas tanto de aquecimento como de arrefecimento são dependentes da temperatura que se considera para a ativação do sistema. Assim, pode-se observar pela tabela 8.9 que existem diferenças na carga de arrefecimento quando se modifica a temperatura de setpoint e também quando se considera a integração dos valores para diferentes períodos, concluindo-se que os valores das cargas são fortemente dependentes destes parâmetros.

Pode-se também constatar que, para a mesma temperatura de ativação do sistema de arrefecimento (25°C), existe uma discrepância no valor da carga de arrefecimento (7,6 kWh/m<sup>2</sup>.ano) quando comparada com o valor anual (11,2 kWh/m<sup>2</sup>.ano) visto anteriormente. Esta ocorrência deve-se ao facto de existir sobreaquecimento no inverno, como será mostrado mais à frente.

Tabela 8.9 - Carga de arrefecimento para diferentes cenários.

Condição	Setpoint arrefecimento [°C]	Carga arrefecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	
Com ventilação natural	25	4 meses (2928 horas)	5,2
		Ano inteiro	7,6
		Período ocupação ano inteiro	4,5
	26	Ano inteiro	5,9
		Período ocupação	3,6
		Sem ventilação natural	25
26	Ano inteiro		7,0

### 8.3.3 Estação de Aquecimento

- Necessidades de aquecimento

A tabela 8.10 mostra as necessidades de aquecimento registadas para que a temperatura da habitação (sala, quartos e cozinha) não fosse inferior a 20°C. Podem-se observar ligeiras diferenças comparando com o valor de carga de aquecimento anual, o que pode ser explicado por provavelmente existirem algumas horas fora do período de Inverno em que é necessário aquecer.

Tabela 8.10 - Carga de aquecimento para todo o período de Inverno e apenas para o período de ocupação (no Inverno).

	Carga aquecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
Toda a estação de aquecimento	7,0
Para o período de ocupação	1,1

- Necessidades de arrefecimento

Uma vez que se observou que a carga de arrefecimento na estação de arrefecimento não corresponde à totalidade da obtida para todo o ano, decidiu-se estudar, para a estação de aquecimento, a quantidade de horas em que a temperatura excede o limite de conforto imposto (25°C) e, conseqüentemente, a necessidade de arrefecer os espaços. Assim, os resultados obtidos encontram-se na tabela 8.11, podendo-se confirmar que a carga de arrefecimento corresponde à parcela que está em falta na registada no Verão.

Tabela 8.11 - Carga de arrefecimento na estação de aquecimento

---

<b>Zona</b>	<b>Número de horas &gt; 25°C</b>	<b>Carga arrefecimento</b>
<b>Sala</b>	589	3,6 kWh/m <sup>2</sup> .ano
<b>Cozinha</b>	410	
<b>Quarto 1 2 e 3</b>	323	
<b>Restantes zonas</b>	9	

---



## Capítulo 9. Ciclo de vida dos edifícios

O sector dos edifícios tem uma grande contribuição no uso de energia primária, o que resulta num aumento das emissões de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, num impacto ambiental negativo. Desta forma, num contexto de desenvolvimento sustentável, os edifícios deveriam ser construídos de forma a que utilizassem o mínimo de recursos possíveis e que durante a fase de utilização conseguissem causar um baixo impacto ambiental na manutenção do conforto dos ocupantes. O ciclo de vida de um edifício inclui a produção dos materiais utilizados, a construção, operação, manutenção, demolição e gestão de resíduos. Vários estudos mostram que para edifícios construídos em regiões temperadas ou frias, a maior parte da energia utilizada durante o ciclo de vida corresponde à fase de operação (80-90%), enquanto que a fase de produção dos materiais (energia incorporada) utiliza cerca de 10-20%. A energia utilizada na fase de obra dos edifícios (incluindo o transporte dos materiais até ao local) e na sua demolição no fim de vida tem uma porção muito pequena (1%) assim como a energia utilizada na renovação destes [51]



Figura 9.1 - Esquema do ciclo de vida de um edifício

A energia incorporada é, então, a energia utilizada durante toda a fase de construção de um edifício, ou seja, é a energia contida em todos os materiais utilizados tanto no edifício como nas instalações técnicas. Esta energia é referente à energia utilizada desde a extração das matérias primas (como a escavação), passando pela sua transformação (processos de fabrico) até ao transporte para a fábrica e desta para o consumidor final [52]. Assim, a energia incorporada de um edifício depende da quantidade de materiais utilizados na construção deste e também nos seus valores de energia incorporada, ou seja, no valor de energia requerido durante a sua extração, produção e transporte por unidade de material [51]. Quanto à energia operativa, esta é a energia requerida para as cargas internas do edifício como a climatização (arrefecimento e aquecimento), ventilação mecânica, equipamentos elétricos e iluminação. De todos estes, é normalmente a climatização que tem o maior peso, o que depende essencialmente nos ganhos e perdas de calor do edifício, sendo que quanto maior são, maior a quantidade de energia (eletricidade, óleo, gás) consumida pelos equipamentos de climatização para manter as condições de conforto durante a fase operacional [51]. Assim, esta energia está fortemente dependente do nível de conforto desejado, das condições climáticas e dos padrões de operação (tanto

de ocupação como dos equipamentos elétricos e da iluminação)[52], como se pode observar no capítulo anterior.

Assim, a energia necessária à operação do edifício pode ser consideravelmente reduzida através do melhoramento do isolamento das casas, da redução das perdas por infiltração, da adoção de soluções passivas, entre outras. Estas medidas conseguem, assim, mudar a relação que existe entre a energia operacional e a energia incorporada. Estudos relacionados com edifícios de baixa energia mostram que a energia incorporada pode corresponder a cerca de 40-60% do total de uso de energia. No entanto, estes estudos mostram também que o total de energia necessária num edifício “low-energy” pode ser até superior do que num edifício com uma maior necessidade de energia de operação. Isto deve-se ao facto de a redução da energia operacional poder implicar o aumento dos materiais utilizados, tanto na envolvente como nas instalações e manutenção das instalações técnicas, e por isso o aumento da energia incorporada. Desta forma, à medida que a energia de operação diminui, é cada vez mais importante ter em atenção a energia derivada da produção dos materiais de construção. A redução da energia incorporada passa pela utilização de materiais com uma menor quantidade de energia e que sejam preferencialmente locais. Existem vários estudos relacionados com a substituição dos materiais na construção dos edifícios, sendo que [22] refere que aumentando a utilização da madeira como um material de construção pode ter implicações significativas no que toca à necessidade de energia e às emissões de CO<sub>2</sub>. Estudos sobre a construção Holandesa revelam também que um aumento na utilização da madeira como material de construção poderia reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em 50% comparando com as construções típicas do país [53]. Já [54] realçam o caso francês, onde foi possível reduzir em 215% a energia envolvida na construção de edifícios, graças à preferência pela utilização de materiais locais, minimizando assim o fator “transporte”. No entanto, também é importante ter em consideração que o uso de materiais locais nem sempre é viável no contexto de uma sociedade internacionalizada. Estudos realizados por [55] mencionam ainda que a energia incorporada nos materiais utilizados para a construção de um edifício de escritórios varia entre 13 a 19% da energia operacional, para uma vida útil estimada de 50 anos.

## 9.1 Análise da energia e CO<sub>2</sub> incorporados

Um dos principais objetivos do projetista da habitação estudada nesta dissertação é o de desenvolver um sistema de construção que utilize materiais pouco processados ou com pouca energia incorporada e com reduzido CO<sub>2</sub> associado à sua produção, mas que ao mesmo tempo possa garantir uma elevada eficiência energética. A energia incorporada é definida como o total de energia primária consumida através de processos diretos e indiretos associados aos materiais de construção [56]. Quanto ao carbono incorporado, este é definido como a soma das emissões de carbono relacionadas com o combustível e também das emissões de carbono relacionada com os processos de transformação dos materiais, ou seja, emissões que podem, por exemplo, derivar de reações químicas. Tal como na energia incorporada, esta soma inclui o transporte mas exclui as emissões de carbono na fase operativa [57] e pode ser contabilizada desde o como “Cradle-to-grave”, “Cradle-to-gate” ou “Cradle-to-site” (desde a extração dos materiais até à fase de desconstrução e deposição, até à unidade de transformação ou até chegar ao local da obra, respetivamente). Dessa forma foi analisada a quantidade de energia e CO<sub>2</sub> incorporado na fachada referente à habitação em estudo, variando apenas o isolamento entre os fardos de palha e a cortiça. Com o objetivo de comparar com as soluções construtivas mais utilizadas em Portugal, foi feito o mesmo estudo para a solução de fachada de

parede dupla. Uma vez que um dos focos principais desta dissertação recai sobre as diferenças entre estas duas soluções construtivas, foi feito o estudo apenas para estas construções e não para toda a habitação.

Utilizou-se o Inventário de Carbono e Energia (ICE) cedido pela Universidade de Bath e uma folha de cálculo [58] para analisar qual a quantidade de energia incorporada e também qual a quantidade de CO<sub>2</sub> que os materiais utilizados nos sistemas de construção referidos anteriormente têm por unidade de área. A base de dados ICE foi criada a partir de uma extensa revisão de literatura, sendo que a primeira versão foi lançada em 2005 tendo vindo a ser atualizada em intervalos periódicos. Foi escolhida esta base de dados uma vez que é um documento bastante fidedigno e que representa um valor médio para toda a Europa. No entanto, os valores presentes no inventário são representativos desde o “berço” até o material sair da fábrica, não considerando o seu transporte. No entanto, esta energia gasta no transporte até ao local de construção foi tida em conta, contudo, a energia despendida e a perda de material durante o processo de construção não foi contabilizada. A figura seguinte demonstra como foi criado este inventário:

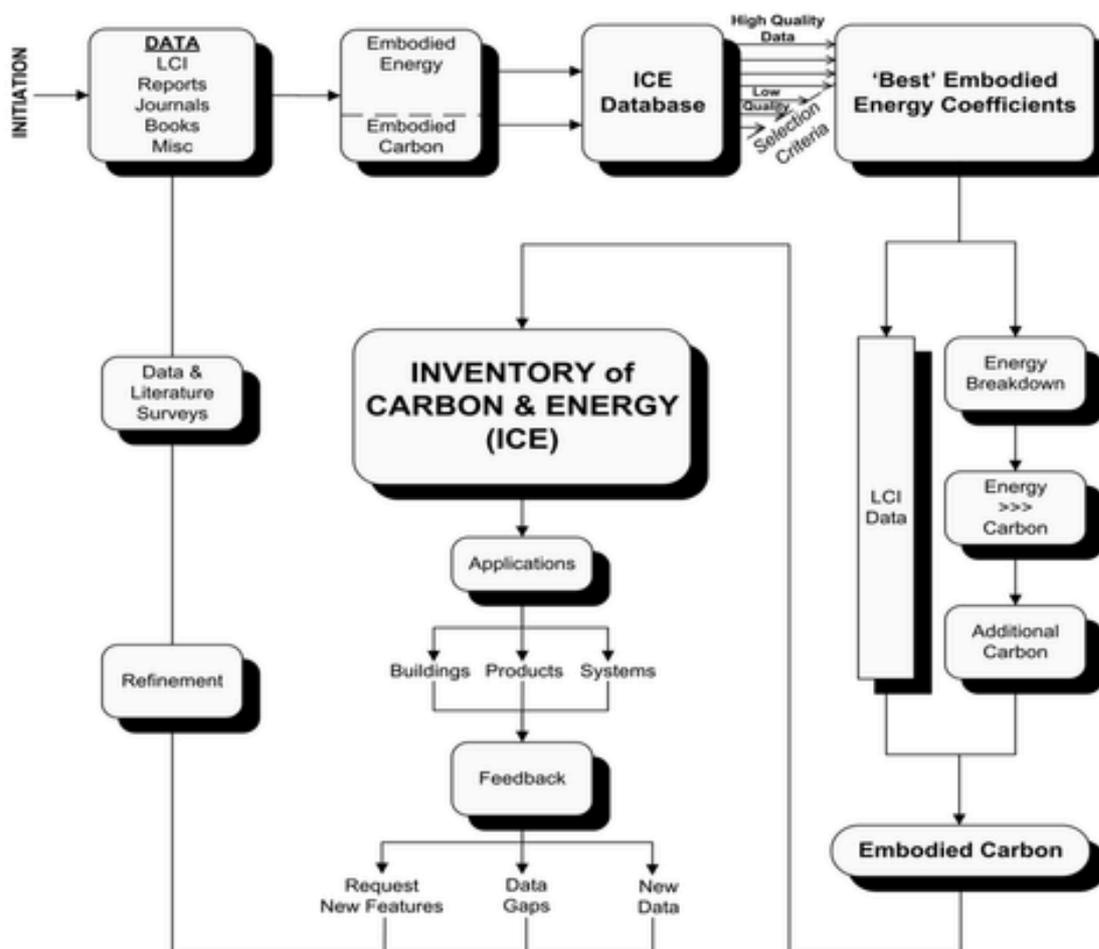


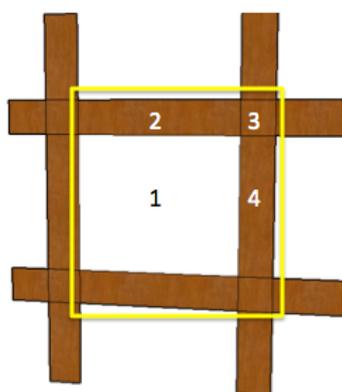
Figura 9.2 - Esquema do processo da criação do inventário de Carbono e Energia.

### 9.1.2 Energia e CO<sub>2</sub> incorporado nos materiais

Para o cálculo da energia e do CO<sub>2</sub> incorporados, foi necessário introduzir alguns dados na folha de cálculo como a espessura do material [m], a sua massa volúmica [m<sup>3</sup>/kg] e os valores retirados do inventário (energia incorporada [MJ/kg] e CO<sub>2</sub> incorporado [kgCO<sub>2eq</sub>/kg]). Sempre que não foi encontrada a informação de um material específico, foi utilizada informação para um semelhante. Quando aos dados de CO<sub>2eq</sub> do inventário, estes têm em conta não só o dióxido de carbono libertado na produção de um certo material, mas também os compostos perfluorados e gases como o metano. Sempre que essa informação não foi encontrada para certo material, foi assumido que correspondia ao valor de CO<sub>2</sub> mais um aumento de 6% desse valor [56].

Uma vez que na fachada de parede dupla o fluxo de calor atravessa sempre a mesma camada de materiais, ou seja, em qualquer parte da parede a solução construtiva é sempre a mesma, foi apenas necessário colocar os valores mencionados anteriormente na folha de cálculo, obtendo-se diretamente o valor em MJ/m<sup>2</sup> e em kgCO<sub>2e</sub>/m<sup>2</sup>.

Quanto à fachada da habitação em estudo, uma vez que o fluxo de calor não atravessa sempre o mesmo conjunto de camadas de materiais, foi necessário realizar uma média ponderada entre as áreas correspondentes a cada solução construtiva. Assim, foi necessário dividir a estrutura em três combinações pertencentes a uma estrutura que se repete, como se exemplifica de seguida:



- 1 – Madeira, reboco de cal, isolamento, OSB3, gesso cartonado
- 2 – Madeira, ripado horizontal/vertical, reboco de cal, isolamento, OSB3, gesso cartonado
- 3 – Madeira, ripado horizontal, ripado vertical, reboco de cal, isolamento, OSB3, gesso cartonado

Figura 9.3 - Esquema representativo da estrutura reticulada formada pelos ripados de madeira

De seguida, foi introduzida cada solução (1, 2 e 3) e a respetiva área numa folha de cálculo em separado, obtendo-se no final a média ponderada. Uma vez que a fachada da habitação em estudo é revestida por dois materiais distintos (ThermoWood e telha cerâmica) como já explicado anteriormente, foi necessário calcular primeiramente a quantidade de energia e CO<sub>2</sub> incorporada em cada tipo de solução construtiva e posteriormente multiplicar esses valores pelas áreas de fachada correspondente, para que se obtivesse um resultado real da fachada em estudo. Os dados retirados do inventário estão descritos na tabela 9.1 e os resultados obtidos na tabela 9.2.

Desempenho térmico de edifícios com materiais de reduzida energia incorporada – caso de estudo de um sistema construtivo modular pré-fabricado

Tabela 9.1 - Designação e valores de energia e CO<sub>2</sub> incorporado dos materiais retirados do inventário de Bath utilizados no estudo.<sup>1</sup>

Material		EE [MJ/kg]	EC [kgCO <sub>2</sub> e/kg]
Madeira (revestimento, ripados)	General Timber	10	0,31 <sub>fós</sub> +0,41 <sub>bio</sub> <sup>2</sup>
Reboco de cal	Lime Mortar	1,11	0,174
Gesso cartonado	Plasterboard	6,75	0,39
Fardos de palha	Straw	0,24	0,01
Granulado de cortiça	Cork	4	0,19
OSB	Oriented Strand Board	15	0,45 <sub>fós</sub> +0,54 <sub>bio</sub>
Reboco	Plaster (General)	1,8	0,13
EPS	Expanded polystyrene	88,60	3,29
Tijolo	Common brick	3	0,24
Telha	Ceramic Tiles	12	0,78

Tabela 9.2 - Valores de energia incorporada por m<sup>2</sup> das soluções construtivas estudadas

Tipo de fachada	Energia Incorporada [MJ/m <sup>2</sup> ]	CO <sub>2</sub> Incorporado [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]
Parede com isolamento de palha e revestimento de madeira	480	31
Parede com isolamento de granulado de cortiça e revestimento de madeira	583	40
Parede com isolamento de palha e revestimento de telha cerâmica	782	49
Parede com isolamento de granulado de cortiça e revestimento de telha cerâmica	847	55
Parede dupla [alvenarias de 11cm e 15cm]	960	81

<sup>1</sup> Uma vez que, dos materiais isolantes testados neste projeto, apenas os valores para a palha e cortiça se encontram no inventário, fez-se os cálculos apenas para as soluções construtivas com estes dois isolamentos.

<sup>2</sup> Para os produtos de madeira, o valor é separado entre as emissões de CO<sub>2</sub> libertadas por combustíveis fósseis e pela queima de biomassa. Uma vez que não se tem a informação da origem do produto utilizado (florestas certificadas ou não), foram somados os dois valores

A partir dos valores calculados para cada solução em separado pode-se concluir que o revestimento tem uma grande influência na quantidade de energia incorporada, uma vez que para o mesmo isolamento (palha), esta aumenta em 40% quando o revestimento é de telha em vez de madeira. Quanto ao tipo de isolamento, este também influencia os valores, sendo que para o mesmo revestimento (madeira), a energia aumenta em 20% quando o isolamento é de cortiça em vez de palha. Como seria de esperar, a solução de parede dupla é a solução com maior energia e CO<sub>2</sub> incorporados pelo facto de ser a estrutura mais pesada e com os materiais mais processados.

Multiplicando o valor obtido de energia incorporada [MJ/m<sup>2</sup>] da parede dupla pela área total de fachada da habitação (162,5 m<sup>2</sup>) obtém-se um valor de  $1,6 \times 10^5$  MJ. Quanto à fachada da habitação em estudo, uma vez que parte dela é revestida com madeira e a outra com telha, foi multiplicado o valor de energia/CO<sub>2</sub> incorporados obtidos (para um isolamento de palha e um de cortiça) pelo valor de área correspondente (105,75m<sup>2</sup> de fachada com revestimento em madeira e 56,76 m<sup>2</sup> de fachada com revestimento em telha cerâmica).

Através da figura 9.4 pode-se concluir que a energia incorporada na parede dupla é cerca de 40% superior ao valor obtido para a parede com isolamento de palha ( $9,51 \times 10^4$  MJ) e 32% superior à da parede com isolamento de cortiça ( $1,10 \times 10^5$  MJ). Quanto ao CO<sub>2</sub>, a discrepância ainda é maior, observando-se um aumento de 64% e 75% entre a parede dupla ( $2,26 \times 10^4$  kgCO<sub>2</sub>) e a fachada com isolamento de cortiça ( $8,09 \times 10^3$  kgCO<sub>2</sub>) e palha ( $6,06 \times 10^3$  kgCO<sub>2</sub>), respetivamente. Tal resultado já era esperado uma vez que a solução construtiva da parede pré-fabricada é constituída por materiais mais naturais, ou seja, menos processados e com uma menor libertação de gases durante os processos de transformação.

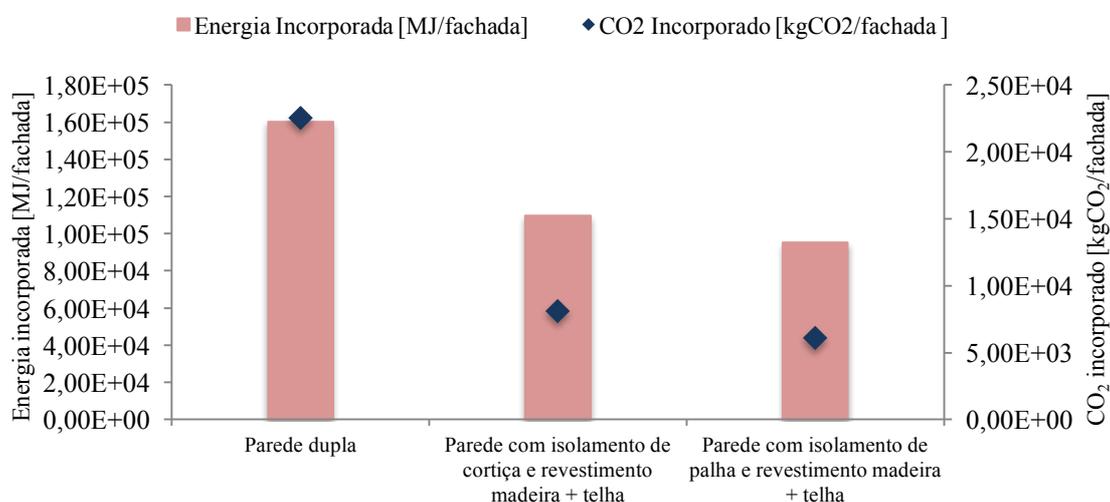


Figura 9.4 - Comparação da energia e CO<sub>2</sub> incorporados da fachada de parede dupla com a fachada da habitação em estudo

De forma a quantificar a energia e CO<sub>2</sub> incorporado em cada material das soluções construtivas e não na fachada como um todo, foi posteriormente calculado o peso que cada um representa no total. No caso da fachada de alvenaria dupla, uma vez que contém sempre a mesma solução construtiva, foi apenas necessário multiplicar a espessura de cada material pela respetiva massa volúmica, e posteriormente este resultado pelo valor de energia/CO<sub>2</sub> incorporados retirados do inventário (Tabela

10.3). Assim, obtiveram-se os valores de energia e CO<sub>2</sub> incorporados por cada m<sup>2</sup> de fachada, como se pode observar na figura 10.5

Tabela 9.3 - Valores de massa volúmica, energia incorporada e CO<sub>2</sub> incorporado para os materiais constituintes do sistema ETICS

Material	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Energia Incorporada [MJ/kg]	CO <sub>2</sub> incorporado [kgCO <sub>2</sub> /kg]
Reboco (total)	900	6,75	5,265
Alvenaria (15cm)	773	3	39,6
Alvenaria (11cm)	782	3	29,04
Isolante térmico (EPS)	15	88,6	2,961

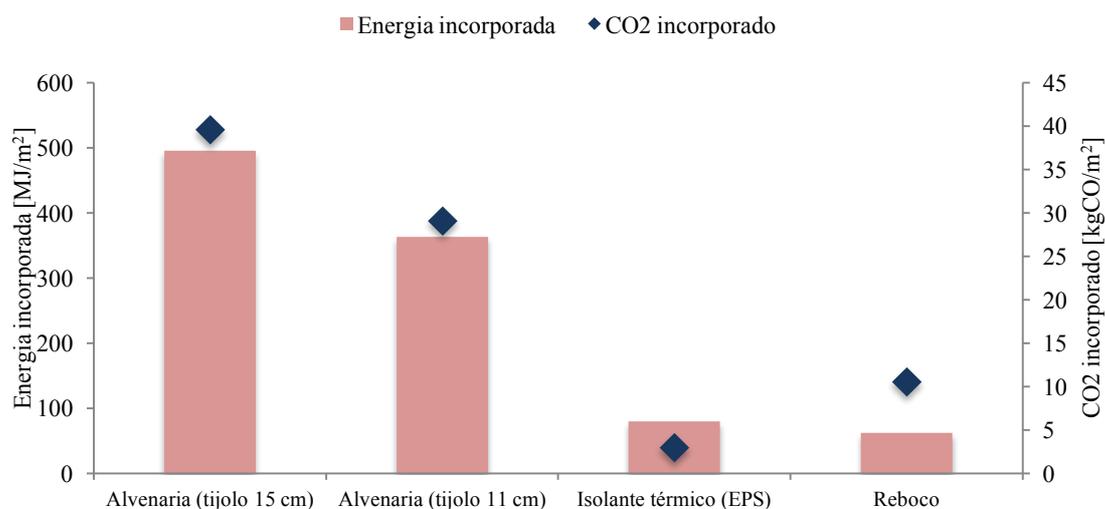


Figura 9.5 - Valores de energia incorporada (MJ/m<sup>2</sup>) e dióxido de carbono dos materiais constituintes da parede dupla.

Pode-se observar que é o pano de alvenaria dupla de tijolo que contém a maior percentagem de energia incorporada por m<sup>2</sup> nesta solução construtiva, com um total de 990 MJ/m<sup>2</sup>. Embora o tijolo tenha uma reduzida energia incorporada (3 MJ/kg), tem também uma elevada massa volúmica e espessura e, conseqüentemente, contribui com o maior peso por cada unidade de área. No entanto, olhando para os valores de energia incorporada correspondente a cada material, pode-se concluir que é o poliestireno expandido (EPS) que tem o maior valor, 88,6 MJ/kg, pois trata-se de um material orgânico-sintético, tendo por isso um grau de transformação elevado e, conseqüentemente, uma maior energia associada. Observando a figura 9.6, pode-se concluir que o EPS apresenta um maior gasto de energia associado à sua produção comparado com outros isolamentos térmicos.

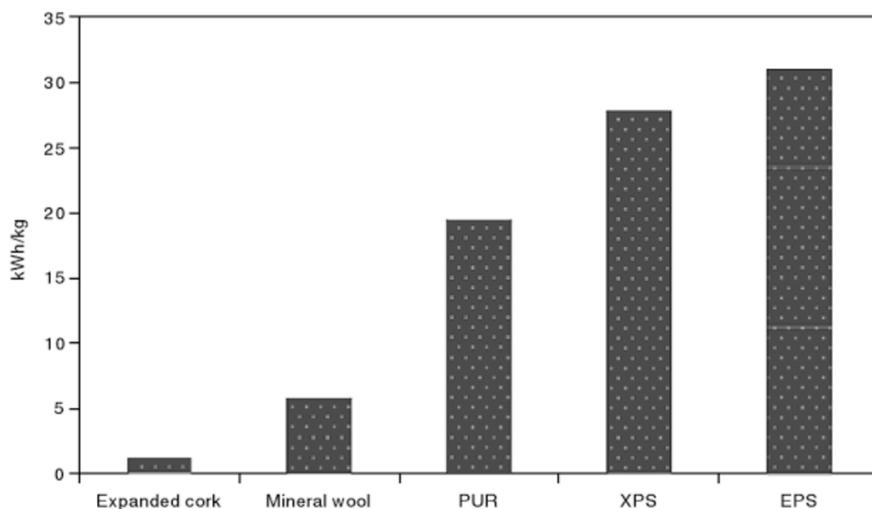


Figura 9.6 Energia utilizada na produção de isolamentos térmicos - [59]

Quanto à fachada da habitação em estudo, tipicamente uma construção não homogénea, foi necessário realizar, para além dos mesmos cálculos efetuados para a parede dupla tendo por base os valores da tabela 9.4, uma média ponderada de todos os valores obtidos para cada área de solução construtiva. Todos estes cálculos encontram-se no Anexo 3 e Anexo 4 e os resultados podem ser observados na figura 9.7:

Tabela 9.4 - Valores de massa volúmica, energia incorporada e CO<sub>2</sub> incorporado dos materiais estudados.

Material	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Energia Incorporada [MJ/kg]	CO <sub>2</sub> Incorporado [kgCO <sub>2</sub> e/kg]
OSB	900	15	0,99
Telha cerâmica	1500	12	0,78
Madeira	15	10	0,72
Gesso cartonado	1100	6,75	0,39
Granulado de cortiça	70	4	0,19
Reboco de cal	1600	1,11	0,17
Fardos de palha	110	0,24	0,01

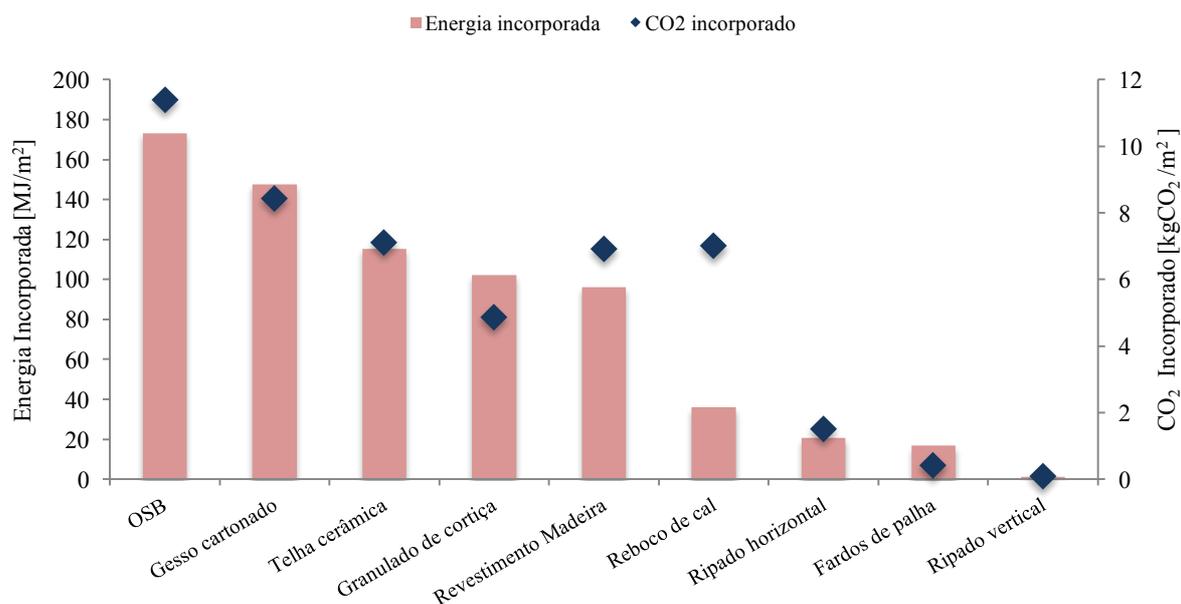


Figura 9.7 - Energia e CO<sub>2</sub> incorporados nos materiais constituintes da fachada por cada m<sup>2</sup>

Observando os resultados obtidos, verifica-se que o OSB contém uma maior energia incorporada por unidade de área de fachada, pois entre todos os materiais é o que resulta de mais processos de transformação. Quanto ao isolamento térmico, verifica-se uma diferença significativa entre o granulado de cortiça e os fardos de palha tanto a nível de energia como CO<sub>2</sub> incorporado, sendo que os fardos mostram ser um material com mais vantagens em termos ambientais.

### 9.1.2 Energia associada ao transporte

Nas versões anteriores do inventário de Bath, era considerado que os valores correspondiam à energia incorporada “Cradle to site”, ou seja, desde a extração das matérias primas até ao local de construção da obra. Esta consideração deixou de ser feita uma vez que se chegou à conclusão que a energia associada ao transporte não podia ser desprezada para certos materiais de construção. Esta decisão levou também a que se encorajasse todos os utilizadores do inventário a fazerem os próprios cálculos de energia associada ao transporte para o seu caso específico [56]. Uma vez que não se consideraram os cálculos da energia incorporada para toda a habitação, os cálculos associados à energia do transporte também foram apenas realizados para a parede exterior. Com base em [60], foi admitida uma distância média entre a fábrica e o local de obra de 30km e um valor médio para a energia gasta no transporte de 1,5MJ/ton.kg, a partir da tabela 9.5.

Tabela 9.5 - Valores de energia associado aos tipos de transporte – adaptado de [61]

Tipo de transporte	MJ/ton.km
Avião	33-36
Rodovia (gasóleo)	0,8-2,2
Ferrovia (gasóleo)	0,6-0,9

Ferrovias (eletricidade)	0,2-0,4
Barco	0,3-0,9

Desta forma foi necessário calcular o peso que cada tipo de fachada teria, de forma a se fazer uma comparação entre a energia gasta a transportar os materiais constituintes de cada uma.

### 9.1.2.1 Parede pré-fabricada do projeto em estudo

Sabe-se que o peso de um módulo sem revestimentos exterior e interior pesa cerca de 185kg e que serão necessários 53 módulos e 11 “meios” módulos, obtendo-se um total de 58,5 módulos e um peso de 10,82 ton. De forma a se saber mais pormenorizadamente o peso total da fachada, foi calculada a contribuição dada pelos revestimentos exteriores (telha e ThermoWood) e interior (gesso cartonado).

Sabendo que a telha que será utilizada tem um peso de 4 kg e num metro quadrado cabem cerca de 12 [62], para o total de área de fachada que terá telha como revestimento ( $56,76\text{m}^2$ ), obtém-se um peso de 2724,5kg. Quanto ao revestimento de madeira (ThermoWood), dado que não se encontrou o peso específico nem médio do material, foi utilizada a sua massa volúmica ( $400\text{ kg/m}^3$ ). A partir do desenho em Sketchup foi calculado o volume total deste material, obtendo-se um valor de  $2,47\text{m}^3$ , que, multiplicando pelo valor de massa volúmica, obtém-se um peso de 986,5kg.

Quanto ao revestimento interior (gesso cartonado), para a espessura utilizada, este tem um peso de  $13\text{kg/m}^2$  [63] que multiplicado pela área total da fachada, obtém-se um peso de 2145kg.

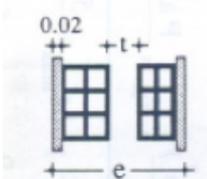
Assim, somando os valores obtidos, tem-se um peso de 5855,5kg que adicionado ao peso do total de módulos inicial dá um total de 16678kg (16,6ton). A energia associada ao seu transporte é, assim, de 747MJ.

### 9.1.2.2 Parede dupla

Uma vez que este tipo de parede é bastante comum em Portugal, foi relativamente fácil encontrar um valor para o peso da parede de alvenaria. Assim, através da tabela 9.6 pode-se observar valores de pesos consoante a dimensão dos tijolos [64]. Para o caso de estudo, como já visto anteriormente, é utilizada uma alvenaria com revestimento exterior e interior de reboco 2 cm e tijolos de 11cm e 15cm, sendo o peso correspondente de  $3\text{kN/m}^2$  ( $305,91\text{kg/m}^2$ ), como se pode observar na tabela. Quanto ao isolamento térmico (EPS), uma vez que este tem uma reduzida massa volúmica ( $15\text{kg/m}^3$ ) e, consequentemente, um reduzido peso por cada  $\text{m}^2$ , decidiu-se desprezá-lo pois não teria uma grande influência no resultado final.

Assim, o peso total da fachada com parede dupla é de 50475,15kg (50,47ton), obtendo-se assim uma energia associada ao seu transporte de 2271,2MJ.

Tabela 9.6 - Peso de alvenarias de tijolo para várias dimensões [64]

Dimensões		Peso [kN/m <sup>2</sup> ]
<p><b>Tijolo furado</b></p> <p><b>Paredes Duplas</b></p> 	30x20x7 + 30x20x7	2,2
	30x20x7 + 30x20x11	2,4
	30x20x7 + 30x20x15	2,7
	30x20x11 + 30x20x11	2,6
	<b>30x20x11 + 30x20x15</b>	<b>3</b>
	30x20x15 + 30x20x15	3,3

Através desses resultados é possível calcular a energia associada ao transporte de cada tipo de fachada, que é dada pela equação 10.1 e os resultados encontram-se na tabela 10.7.

$$E_{\text{transporte}} = E_{\text{tipo de transporte}} \times \text{km}_{\text{percorridos}} \times \text{peso}_{\text{material}} \quad \text{Equação 10.1}$$

Tabela 9.7 - Energia associada ao transporte para cada tipo de fachada

	Peso [ton]	Distância percorrida [km]	Energia associada ao transporte [MJ]
Fachada habitação em estudo	16,6	30	747
Fachada de alvenaria dupla	50,47	30	2271,2

Pode-se concluir que, considerando a mesma distância percorrida, a energia associada ao transporte dos materiais da parede dupla é significativamente superior, dado que o peso é bastante mais elevado. No entanto, há que ter em conta que a diferença entre os resultados poderia ser ainda maior se houvesse informação sobre as distâncias percorridas para cada material, uma vez que se pretende que os materiais que venham a ser utilizados na habitação em estudo sejam locais.

## 9.2 Análise da energia operacional

A influência da escolha dos materiais de construção na quantidade de energia gasta durante a fase operacional de um edifício também tem sido investigada. Como refere [65], foi analisado o efeito da massa térmica sobre a quantidade de energia requerida para aquecimento e arrefecimento e no balanço de energia primária dos edifícios. Assim, foi calculada a redução dessa energia durante a fase de operação de um edifício de referência situado na Suíça, tendo uma estrutura de madeira e de cimento. Descobriram que, com a estrutura de cimento, a energia requerida para aquecimento do edifício diminuía ligeiramente (0,5-2,4%) quando comparada com o edifício com estrutura de madeira, devido ao facto da sua inércia térmica ser superior. Já [66] tiveram uma abordagem semelhante e compararam

construções idênticas em madeira e cimento em Las Vegas e descobriram que a construção em madeira requeria uma maior carga de aquecimento mas uma menor carga de arrefecimento quando comparada com o edifício com estrutura em cimento. No entanto, o efeito da massa térmica nos edifícios é influenciada por vários parâmetros como o clima, orientação do edifício, área de envidraçados, isolamento térmico, ventilação e os padrões de ocupação [67].

Quanto a [68], estes compararam a energia total requerida no ciclo de vida de edifícios de escritório construídos com estrutura de madeira, aço e cimento e descobriram que a estrutura em cimento consumiu 1,39 vezes mais energia do que a estrutura em madeira. Foi também observado por [69] que as construções em madeira utilizam 7 vezes menos energia do que construções em aço ou cimento, estimando ainda que aumentando a utilização deste material na Europa, poderia reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 35 a 50 Mt CO<sub>2eq</sub> por ano, o que corresponde a cerca de 0,9-1,3% do total de emissões da Europa.

De acordo com [70], casas construídas no Reino Unido com fardos de palha (e janelas com vidro triplo) revelaram um isolamento três vezes mais eficiente do que o requerido no país, podendo reduzir as necessidades de aquecimento até 90% quando comparadas com as habitações existentes. Quanto a estudos térmicos de habitações em fardos de palha realizados em Portugal, não foram encontradas quaisquer informações.

Assim, de forma a ter-se uma noção da diferença que existe entre a energia na fase de operação de uma habitação com uma construção típica e a da casa em estudo, foi contabilizada a energia referente às cargas de climatização, aos equipamentos elétricos e à iluminação. Apesar de todos os cálculos realizados anteriormente referentes à energia e CO<sub>2</sub> incorporados terem sido feitos apenas para as paredes exteriores da habitação, decidiu-se, pelo facto de a energia operacional ser fortemente dependente das soluções construtivas, que na habitação com uma construção típica seriam alteradas todas as soluções construtivas (paredes exteriores, paredes interiores, pavimentos e cobertura) e não só a solução da fachada. Assim sendo, não foi possível realizar uma comparação direta entre os valores obtidos para a energia incorporada e operacional, uma vez que não foram realizadas nas mesmas condições.

Desta forma criou-se um novo modelo no software EnergyPlus em que, do modelo inicial, apenas se alteraram as soluções construtivas para soluções tipicamente utilizadas em Portugal, sendo que a composição desses elementos foi baseada no documento ITE50 e encontram-se na tabela 9.8. Para além desta energia depender essencialmente do tipo de soluções construtivas utilizadas como mencionado anteriormente, também é dependente da gama de temperatura de conforto adotada assim como os padrões de ocupação, das luzes e dos equipamentos elétricos.

Uma vez que o objetivo é fazer a comparação aos materiais utilizados, será a energia correspondente à climatização que ditará a diferença entre a energia operacional para as duas soluções, uma vez que a energia correspondente à iluminação e equipamentos elétricos manter-se-á igual, visto que os padrões de utilização permanecerão inalterados. Foram utilizados todos os pressupostos empregados anteriormente (calendários de ocupação, luzes e equipamentos elétricos, ventilação natural e *IdealLoads* com setpoints de 20°C e 25°C).

Desempenho térmico de edifícios com materiais de reduzida energia incorporada – caso de estudo de um sistema construtivo modular pré-fabricado

Tabela 9.8 - Soluções construtivas comuns em Portugal

Solução construtiva	Material	Condutividade [W/m.K]	Densidade [Kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/Kg.K]	U-value <sup>3</sup> [W/m <sup>2</sup> .K]	
Parede exterior	Exterior	Reboco	1,3	1900	780	0,65
		Tijolo 15cm	0,45	773	828	
		Espaço de ar 5cm		R=0,18		
		EPS 30mm	0,045	15	1512	
		Tijolo 11cm	0,45	782	828	
	Interior	Reboco 2,5cm	1,3	1900	780	
Parede de compartimentação	Exterior	Reboco 2,5cm	1,3	1900	780	0,51
		Tijolo 11cm	0,45	1300	828	
	Interior	Reboco 2,5cm	1,3	1900	780	
Pavimento de compartimentação	Exterior	Reboco 2,5cm	1,3	1900	780	1,71
		Estuque 1,5cm	0,3	750	1805	
		Laje de betão 20cm	2,1	2400	927	
		Betonilha 1,5cm	1,3	1800	880	
	Interior	Taco de madeira 2,2cm	0,14	545	1380	
Pavimento interior	Exterior	Laje maciça em betão armado 20cm	2,1	2400	927	0,70
		EPS 50mm	0,045	15	1512	
		Betonilha 4cm	1,3	1800	880	
	Interior	Ladrilho cerâmico 1cm	1,2	2000	756	
Cobertura horizontal interior	Exterior	EPS 50mm	0,045	15	1512	0,7
		Laje maciça em betão armado	2,1	2400	927	
	Interior	Gesso cartonado 1,25cm	0,21	900	1000	

Os resultados obtidos encontram-se nas tabelas seguintes:

Tabela 9.9 - Cargas de aquecimento/arrefecimento para a habitação em estudo e para a habitação com as soluções comuns em Portugal

	U-value da fachada [W/m <sup>2</sup> .K]	Perdas pela envolvente opaca [kWh/estação de aquecimento]	Carga Aquecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Carga Arrefecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
<b>Construção Sustentável</b>	0,19	3959	7,64	11,90
<b>Construção típica</b>	0,65	5322	16,76	12,32

<sup>3</sup> Todos os valores de coeficiente de transmissão térmica incluem as resistências térmicas interior ( $R_{si}$ ) e exterior ( $R_{se}$ ), de acordo com a localização da solução construtiva

Tabela 9.10 - Resultados da energia operacional para os dois modelos

Energia em 50 anos [MWh]	Construção típica	Construção Sustentável
<b>Luzes + Equipamentos elétricos</b>		82,9
<b>Carga aquecimento/arrefecimento</b>	126,2	97,1
<b>Energia Operacional</b>	209,1	180

Através da tabela 9.10 pode-se concluir que existe um decréscimo de cerca de 55% na carga de aquecimento, não existindo praticamente alterações quanto à carga de arrefecimento, indo ao encontro do que refere [70], em que casas construídas no Reino Unido com fardos de palha revelaram um potencial de redução das necessidades de aquecimento até 90% quando comparadas com as habitações existentes. Pode-se, no entanto, concluir que os resultados obtidos não vão de encontro ao mencionado pelos estudos descritos em [65] e [66], o que pode ser explicado pelo facto de que, nesses estudos, o isolamento térmico ter permanecido igual nos dois casos, e pelo facto de o clima de Portugal ser bastante diferente do da Suíça e Estados Unidos.

As perdas pela envolvente opaca e, conseqüentemente, as necessidades de energia para aquecimento estão diretamente relacionadas com as propriedades térmicas dos materiais empregues em cada solução, registando-se maiores perdas através dos elementos opacos na solução que possui um coeficiente de transmissão térmica mais elevado e, assim, um maior gasto de energia na fase operacional. A figura seguinte mostra as perdas através da envolvente opaca da sala referente à habitação com construções típicas, assim como a temperatura interior e exterior.

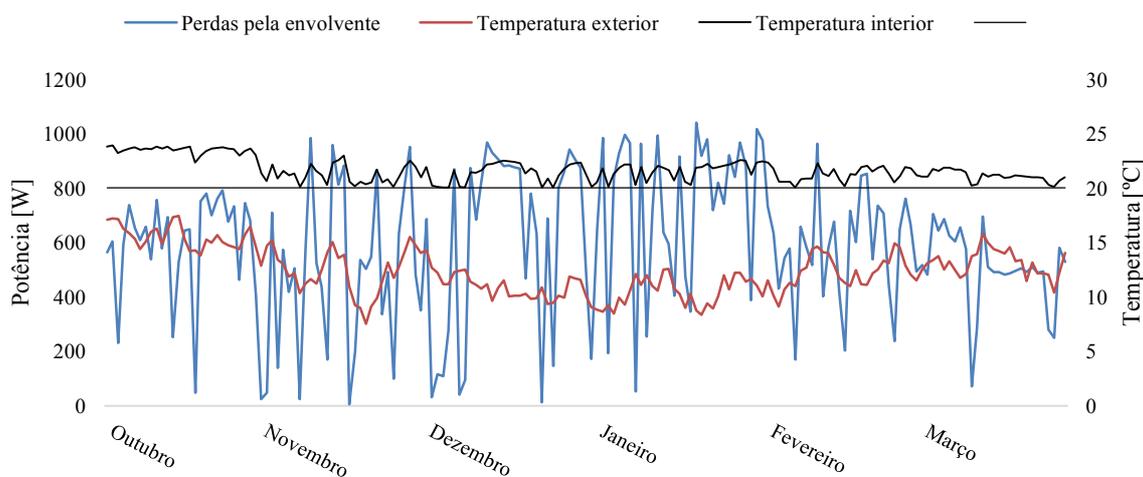


Figura 9.8 - Variação da temperatura interior (sala), temperatura exterior e perdas pela envolvente opaca da sala (habitação típica)

A partir da figura 9.8 é possível observar a ocorrência de perdas na sala durante toda a estação de aquecimento para a habitação típica, verificando-se que as perdas registadas são mais acentuadas quando a temperatura exterior é menor. Quanto à temperatura interior, verifica-se que esta apresenta valores mínimos de 20°C, por corresponder à temperatura de setpoint adotado, chegando a atingir valores de 24°C nos períodos em que a temperatura exterior é mais elevada e as perdas menos acentuadas.

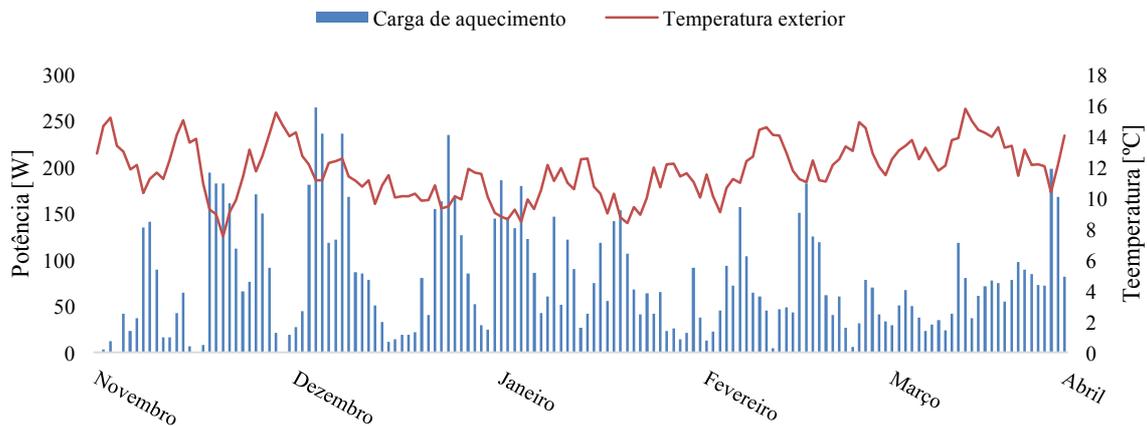


Figura 9.9 - Variação da energia fornecida para aquecimento (para a sala) e da temperatura exterior

Observando a figura 9.9, é possível constatar que a uma maior quantidade de energia fornecida para aquecimento está associada uma menor temperatura exterior. Ao relacionar as duas figuras, é possível concluir que menores temperaturas exteriores originam maiores perdas pela envolvente opaca, o que significa um maior fornecimento de energia para aquecimento de modo a manter a temperatura interior dentro do limite de conforto estabelecido. Pode-se assim concluir que a envolvente exterior da habitação com soluções típicas está mais vulnerável à temperatura exterior do que a habitação em estudo.



## Capítulo 10. Conclusão

Apesar de se assumir como um dos setores económicos mais importantes na Europa, a indústria da construção continua a utilizar métodos de construção tradicionais e mão de obra não qualificada, caracterizando-se pelo consumo excessivo de matérias-primas, de recursos energéticos não renováveis e pela produção excessiva de resíduos [71]. Assim, torna-se indispensável a redução dos impactes negativos ambientais, resultantes da atividade desta indústria e uma mudança no paradigma do processo tradicional de construção para a construção sustentável, uma vez que hoje em dia este sector é responsável por cerca de um terço da produção global de dióxido de carbono e cerca de 40% do consumo de energia. Uma vez que é a envolvente do edifício que desempenha o papel mais significativo no consumo de energia (tanto incorporada como operacional), é neste parâmetro que as mudanças têm que ter um maior foco.

Conclui-se que a habitação constituída pelos módulos pré-fabricados com isolamento de fardos de palha tem um bom comportamento térmico em condições reais de simulação, verificando-se que, com os devidos dispositivos de sombreamento e um adequado sistema de ventilação natural, a habitação encontra-se na maior parte do tempo (cerca de 70%) dentro do intervalo de temperatura de conforto (20-25°C). Assim, foram obtidos valores de 7,6 kWh/m<sup>2</sup>.ano e 10,9 kWh/m<sup>2</sup>.ano para carga de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Estudos feitos [44] demonstram que a baixa difusidade térmica da palha não permite que a parede acumule calor rapidamente, mas o edifício pode estar sujeito a um rápido sobreaquecimento se existirem ganhos solares intensos no Verão ou Inverno. Assim, foi estudado o sobreaquecimento na estação de arrefecimento de acordo com o critério utilizado em [44], concluindo-se que este não existe dentro do horário de ocupação. Quanto à estação de aquecimento, verificaram-se algumas horas com temperatura acima da temperatura de referência 25°C.

Verificaram-se diferenças entre os valores obtidos para as cargas de climatização através do método REH e E<sup>+</sup> para os mesmos dados climáticos, assim como para os valores de ganhos e perdas da habitação, concluindo-se que o regulamento, para este tipo de habitações, sobredimensiona a carga de aquecimento. Conclui-se que este tipo de solução construtiva (módulo pré-fabricado com isolamento de palha) apresenta um valor de coeficiente de transmissão térmica 70% inferior (0,19 W/m<sup>2</sup>.K) quando comparado ao valor da solução de fachada mais comum em Portugal (alvenaria dupla de tijolo com 3cm de EPS) (0,65 W/m<sup>2</sup>.K).

Quanto à comparação entre o valor de energia e CO<sub>2</sub> incorporados nos dois tipos de soluções construtivas, pode-se concluir que a energia incorporada na parede dupla é cerca de 40% superior ao valor obtido para a parede com isolamento de palha (9,51 × 10<sup>5</sup> MJ) Quanto ao CO<sub>2</sub>, a discrepância ainda é maior, observando-se um aumento de 75% entre a parede dupla (2,26 × 10<sup>4</sup> kgCO<sub>2</sub>) e a fachada com isolamento palha (6,06 × 10<sup>5</sup> kgCO<sub>2</sub>). Quanto à energia associada ao transporte, esta revelou-se cerca de 68% superior no caso da parede dupla, para uma distância admitida de 30km, uma vez que se trata de uma solução construtiva significativamente mais pesada (50,5 ton) em relação à fachada do projeto (16,6ton). Relativamente à energia operacional, as diferenças foram menores do que aquilo que inicialmente se esperava, provavelmente pelo facto de a escolha de materiais da habitação típica ter sido feita tendo em consideração os limites impostos pelo regulamento (REH). No entanto, os resultados através de simulação dinâmica revelaram que a carga de aquecimento da habitação com construções correntes diminuiu cerca de 55% em relação à habitação estudada nesta

dissertação, não existindo praticamente alterações no valor da carga de arrefecimento, tendo-se obtido um valor de energia operacional de 209MWh e 180MWh, respetivamente, o que demonstra que a escolha de materiais influencia fortemente o gasto de energia e a libertação de CO<sub>2</sub> associado quer à sua extração, quer ao seu transporte e durante o seu tempo de vida. A tabela 10.1 sintetiza os resultados obtidos.

O estudo realizado demonstra, assim, que a escolha de sistemas construtivos e dos materiais utilizados na indústria de construção pode reduzir substancialmente a energia necessária e a libertação de CO<sub>2</sub> na fase de extração, transformação e transporte. A diferença pode ser ainda maior na fase de utilização em que a responsabilidade e informação dos utilizadores em operar o edifício de uma forma mais eficiente pode aumentar o conforto e, conseqüentemente, diminuir as necessidades energéticas do edifício.

Tabela 10.1 - Síntese dos resultados obtidos

<i>Condições do REH</i>			
	<b>REH</b>	<b>REH (com dados climáticos E+)</b>	<b>EnergyPlus (E+)</b>
<b>Carga Arrefecimento [kWh/m<sup>2</sup>.ano]</b>	6,9	5,7	9,0
<b>Carga Aquecimento[kWh/m<sup>2</sup>.ano]</b>	18,6	21,1	3,8
		<i>Condições aproximadas ao real – Simulação E+</i>	
		<b>Construção Sustentável</b>	<b>Construção típica</b>
<b>Coefficiente de transmissão térmica da fachada [W/m<sup>2</sup>.K]</b>		0,19	0,65
<b>Carga aquecimento [kWh/m<sup>2</sup>]</b>		7,64	16,76
<b>Carga arrefecimento [kWh/m<sup>2</sup>]</b>		11,90	12,32
<b>Energia incorporada na fachada [MJ]</b>	<b>Associada aos materiais [MJ]</b>	9,51 × 10 <sup>4</sup>	16,12 × 10 <sup>4</sup>
	<b>Associada ao transporte [MJ]</b>	747	2271,21
<b>CO<sub>2</sub> incorporado na fachada [kgCO<sub>2</sub>]</b>		6,06 × 10 <sup>3</sup>	22,62 × 10 <sup>3</sup>
<b>Energia operacional [MWh]</b>		180	209,12

## Referências

- [1] Comissão Europeia, [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>.
- [2] Agência Internacional da Energia, *Technology Roadmap - Energy efficient building envelopes*, 2013.
- [3] C. Yuan Hsieh e C. Wu, “Applying building information modeling in evaluating building envelope energy performance”.
- [4] U.S. Department of Energy, “Energy Efficiency Building Envelope,” [Online]. Available: [http://www2.lbl.gov/mfea/assets/docs/posters/17\\_MEAW\\_Poster\\_Selk\\_Envelope\\_Final.pdf](http://www2.lbl.gov/mfea/assets/docs/posters/17_MEAW_Poster_Selk_Envelope_Final.pdf).
- [5] C. Oliveira e P. Raes, 2012.
- [6] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera e D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, vol. 6th Edition, United States of America: John Wiley & Sons, 2011.
- [7] F. M. Hai-xiang Zhao, “A review on the prediction of building energy consumption,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, nº 6, p. 3586–3592, August 2012.
- [8] M. J. N. O. Panão, *Transferência de Calor e Balanço de Energia em Edifícios*, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2015.
- [9] M. Bhavan e B. Marg, *Handbook of Functional Requirements of Buildings (Other than industrial Buildings)*, New Delhi: Indian Standards Institution, 1986.
- [10] F. Marques da Silva, “Ventilação Natural,” 2013. [Online]. Available: [http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier\\_artigo/t\\_1919376852653124265d6.1\\_fernandomarquessilva.pdf](http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/t_1919376852653124265d6.1_fernandomarquessilva.pdf). [Acedido em 10 2016].
- [11] V. Peixoto de Freitas, M. Pinto e A. Sofia Guimarães, “Sistemas de Ventilação Natural/Mistos em Edifícios de Habitação,” [Online]. Available: [http://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/2402/3/VPF\\_Revista%20Climatiza%C3%A7%C3%A3o\\_Julho2007.pdf](http://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/2402/3/VPF_Revista%20Climatiza%C3%A7%C3%A3o_Julho2007.pdf).
- [12] ASHRAE Handbook, *Fundamentals*, Atlanta: Inch-Pound Edition, 2009.
- [13] Autodesk Sustainability Workshop, [Online]. Available: <https://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/human-thermal-comfort>.
- [14] Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação, *Decreto-Lei n.º 118/2013*, 2013.
- [15] EnergyPlus™, “Basic Concepts Manual,” em *Getting Started with EnergyPlus*.
- [16] J. Maria de Medeiros, “Recuperação das Muralhas do Castelo dos Mouros,” 2010.
- [17] F. Moita, *Energia Solar Passiva*, Argumentum.
- [18] H. Gonçalves e J. Mariz Graça, *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*.
- [19] S. CS Coelho da Silva, “Um novo conceito de fachada ventilada,” [Online]. Available: <http://coelhodasilva.pt/cs-fachadas>.
- [20] P. B. Cachim, *Construções em madeira: a madeira como material de construção*, Publindústria, 2007.
- [21] J. d. S. Coutinho, “Materiais de Construção I,” 2004. [Online]. Available: [http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/madeiras1\\_slides.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/madeiras1_slides.pdf).

- [22] A. Buchanan, *Energy and CO2 Advantages of Wood for Sustainable Buildings*, 2007.
- [23] Finnforest, “Thermowood - Manual de revestimento exterior,” [Online]. Available: <http://www.jular.pt/download/Revestimento-exterior-madeira-Thermowood.pdf>.
- [24] LNEC, “Regras para a Concessão de uma aprovação técnica europeia (ETA) ou de um documento de homologação (DH) a sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior,” [Online]. Available: [http://www.lnec.pt/fotos/editor2/QPE/relatorio\\_etics\\_dez\\_2010.pdf](http://www.lnec.pt/fotos/editor2/QPE/relatorio_etics_dez_2010.pdf).
- [25] B. Berge, *The Ecology of Building Materials*, Elsevier, 2009.
- [26] J. Mourão e J. Branco Pedro, *Princípios de edificação Sustentável*, LNEC, 2012.
- [27] A. Sutton, D. Black e P. Walker, “Straw Bale - An introduction to low-impact building materials,” 2011. [Online]. Available: [https://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/projects/low\\_impact\\_materials/IP15\\_11.pdf](https://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/projects/low_impact_materials/IP15_11.pdf).
- [28] A. Chaussinand, J. Scartezzini e V. Nik, “Straw bale: A Waste from Agriculture, a New Construction Material for Sustainable Buildings,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 297-302, November 2015.
- [29] N. Stone, “Thermal Performance of Straw Bale Wall Systems,” [Online]. Available: <http://www.solaripedia.com/files/185.pdf>.
- [30] Isolamentos, Amorim, “Vantagens de utilizar granulado de cortiça como isolamento,” [Online]. Available: <http://www.amorimisolamentos.com/vantagens/quais-as-vantagens/>.
- [31] Isocor, “Aglomerado de cortiça expandida - ficha técnica,” [Online]. Available: [http://live-place.com/pt/Certificados\\_FichasTecnicas/FT/6783\\_AGLNEGROCORTICAEXP\\_FT.PDF](http://live-place.com/pt/Certificados_FichasTecnicas/FT/6783_AGLNEGROCORTICAEXP_FT.PDF).
- [32] M. José das Neves Pires Amado, “Materiais para uma construção sustentável: o caso da cortiça”.
- [33] Isolamentos, Amorim, “Ficha técnica - granulado expandido,” [Online]. Available: [http://www.amorimisolamentos.com/xms/files/FICHA\\_TECNICA/FT\\_Produtos/Amorim\\_Isolamentos\\_FT\\_-\\_Granulado\\_Expandido\\_PT.pdf](http://www.amorimisolamentos.com/xms/files/FICHA_TECNICA/FT_Produtos/Amorim_Isolamentos_FT_-_Granulado_Expandido_PT.pdf).
- [34] F. Chiebao, *Cortiça e Arquitetura*, Euronatura, 2011.
- [35] L. Merlin, “Tudo o que precisa de saber sobre salamandras,” [Online]. Available: <http://www.leroymerlin.pt/Site/Fazer-e-facil/Tutoriais/Tudo-o-que-precisa-saber-sobre-salamandras.aspx>.
- [36] Plastimar, “Sistema ETICS,” [Online]. Available: <http://www.plastimar.pt/index.php?id=69>.
- [37] Corrige, “Sistema Cappotto – ETICS,” [Online]. Available: <http://www.corrige.pt/isolamento-termico-pelo-exterior/>.
- [38] P. Mendonça, “Habitar sob uma segunda pele : estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados,” 2005.
- [39] Ecocasa, “ELEMENTOS DA CONSTRUÇÃO - Paredes,” [Online]. Available: [http://www.ecocasa.pt/construcao\\_content.php?id=24](http://www.ecocasa.pt/construcao_content.php?id=24).
- [40] A. Raes Pinto e B. Dias, “A contribuição dos materiais e das tecnologias para a Construção Sustentável: Caso de estudo: módulo de parede exterior pré-fabricada,” 2016.
- [41] C. A. Pina dos Santos e L. Matias, *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente do edifício*, LNEC, 2006.
- [42] Diário da República, 2ª série Nº 234, *Despacho nº 15793-K/2013*, 2013.
- [43] Canadian Solar Buildings Conference, “Determining the optical properties of shading devices: current modeling approaches and future directions,” [Online]. Available:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.666.2332&rep=rep1&type=pdf>.

- [44] L. Mazzaferro, M. J. Sorgato, R. Vergase, A. Paula Melo e R. Lamberts, “Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o uso do Pré-processador Slab no programa EnergyPlus,” 2013. [Online]. Available: [http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202\\_Manual\\_Slab.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Manual_Slab.pdf) .
- [45] A. Figueiredo, J. Kampf e R. Vicente, “Passive house optimization for Portugal: Overheating evaluation and energy performance,” *Energy and Buildings*, pp. 181-196, 2016.
- [46] Plataforma para a eficiência energética de edifícios, *Eficiência energética em equipamentos e sistemas eléctricos no sector residencia*, 2004.
- [47] G. Carrilho da Graça, A. Augusto e M. M. Lerer, “Solar power net zero energy houses for southern Europe: Feasibility study,” *Solar Energy*, vol. 86, pp. 634-646, 2012.
- [48] A. Manuel Cruz Rocha e Silva, *Caracterização das infiltrações médias anuais em edifícios portugueses através do método de pressurização*, 1991.
- [49] V. Peixoto de Freitas, M. Pinto e A. Sofia Guimarães, *Sistemas de ventilação natural/mistos em edifícios de habitação – Implicações construtivas*.
- [50] J. O. Panão, S. M.L. Camelo e H. J.P. Gonçalves, “Assessment of the Portuguese building thermal code: Newly revised requirements for cooling energy needs used to prevent the overheating of buildings in the summer,” *Energy*, vol. 36, p. 3262–3271, Maio 2011.
- [51] T. Ramesh, R. Prakash e K. K. Shukla, “Life cycle energy analysis of a residential building with different envelopes and climates in Indian context,” *Applied Energy*, 2012.
- [52] T. Ramesh, R. Prakash e K. K. Shukla, “Life Cycle energy analysis of buildings: An overview,” *Energy and Buildings*, 2010.
- [53] C. Thormark, “The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building,” *Building and Environment*, 2006.
- [54] J.-C. Morel, P. Walker, M. Ali Mesbah e M. Oggero, “Building houses with local materials: Means to drastically reduce the environmental impact of construction,” 2001.
- [55] C. T. A. Dimoudi, “Energy and environmental indicators related to construction of office buildings,” *Resources Conservation and Recycling*, pp. 86-95, 2008.
- [56] G. Hammond e C. Jones, *Inventory of Carbon & Energy (ICE)*, Bath.
- [57] A. Moncaster e K. Symons, “A method and tool for 'cradle to grave' embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards,” *Energy and Buildings*, 2013.
- [58] V. M. Rato, *Folha de cálculo - Energia incorporada*.
- [59] F. P. e S. J., *Eco-efficient Construction and Building Materials*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [60] F. Torgal e S. Jalali, “Energia incorporada em materiais de construção versus energia operacional,” *Revista Internacional Construlink*, vol. 9, Junho 2011.
- [61] B. Berge, “The Ecology of Building Materials,” *Architectural Press*, 2009.
- [62] C. d. Silva, “Telha Plasma - Ficha Técnica de produto,” [Online]. Available: <http://www.coelhodasilva.com/images/1/editor/files/Plasma%2814%29.pdf>.
- [63] G. Ibérica, “Placa de gesso - Ficha técnica,” [Online]. Available: [http://www.gyptec.eu/documentos/Ficha\\_Tecnica\\_Gyptec\\_A.pdf](http://www.gyptec.eu/documentos/Ficha_Tecnica_Gyptec_A.pdf) .

- [64] Grupo de Betão Armado e Pré-esforçado, “Tabelas diversas,” [Online]. Available: <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/ee/Tabelas.pdf>.
- [65] A. Doodoo, R. Sathre e L. Gustavsson, *Effect of thermal mass on life cycle primary energy balances of a concrete- and a wood-frame building*, 2012.
- [66] L. Zhu, R. Hurt, D. Correia e R. Boehm, “Detailed energy saving performance analyses on thermal mass walls demonstrated in a zero energy house,” *Energy and Buildings*, 2009.
- [67] C. Balaras, “The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods,” *Energy and Buildings*, 1996.
- [68] R. Cole e P. C. Kernan, “Life-Cycle Energy Use in Office Buildings”.
- [69] P. Eriksson, “Comparative LCAs for wood construction and other construction methods: Energy use and GHG emissions,” *Swedish Wood Association*.
- [70] Universidade de Bath, “First straw eco homes could cut heating bills by 90 per cent,” [Online]. Available: <http://www.bath.ac.uk/research/news/2015/02/09/first-straw-eco-homes/>.
- [71] L. Bragança, R. Mateus e M. Gouveia, “Construção Sustentável: O novo paradigma do setor da construção,” *Paredes divisórias: Passado, presente e futuro*.
- [72] EnergyPlusTM, InputOutput Reference.
- [73] AutoDesk, “AutoDesk University,” 2014. [Online]. Available: <http://auworkshop.autodesk.com/library/building-science/natural-ventilation>.
- [74] EnergyPlusTM, “Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations,” 2015.
- [75] D. Aelenei, *REH light*, 2016.
- [76] P. Correia Pereira da Silva, “Análise do Comportamento térmico de construções não convencionais através de simulação em VISualdoe”.
- [77] B. Hodge, *Building your Straw Bale Home: from Foundations to The Roof*, CSIRO, 2006.
- [78] P. e. Decoração. [Online]. Available: <http://www.pedradecoracao.pt/uncategorized/e-porque-nao-uma-salamandra-se-nao-lhe-agrada-instalar-uma-lareira-8836/>.
- [79] N. A. M. Mateus, “Validação de modelos de simulação térmica num edifício de dupla pele sem climatização”.
- [80] F. Torgal e S. Jalali, “Energia Incorporada em Materiais de Construção Versus Energia Operacional,” *Construlink*, vol. 9, pp. 1645-5576, 2011.
- [81] Comissão Europeia, “Energy Efficiency - Buildings,” [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>.
- [82] Agência Internacional da Energia, *Technology Roadmap - Energy efficient building envelopes*, 2013.
- [83] C. Yuan Hsieh e C. Wu, “Applying building information modeling in evaluating building envelope energy performance,” Taiwan .

## Anexos

### Anexo 1: Folha de cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento

#### Folha de Cálculo E

#### NECESSIDADES NOMINAIS ANUAIS DE ENERGIA ÚTIL PARA AQUECIMENTO

##### E.1 - COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

$$\begin{aligned} &\text{Coeficiente de transferência de calor por transmissão } H_{tr} \quad 229,63 \quad \text{W/}^\circ\text{C} \\ &+ \\ &\text{Coeficiente de transferência de calor por renovação do ar } H_{ve,i} \quad 49,73 \quad \text{W/}^\circ\text{C} \\ &= \\ &\text{Coeficiente de transferência de calor } H_{t,i} \quad 279,36 \quad \text{W/}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

##### E.2 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR TRANSMISSÃO

$$\begin{aligned} &0,024 \\ &x \\ &\text{Número de graus-dias de aquecimento GD} \quad 1\,168 \quad ^\circ\text{C.dias} \\ &x \\ &\text{Coeficiente de transferência de calor por transmissão } H_{tr} \quad 229,63 \quad \text{W/}^\circ\text{C} \\ &= \\ &\text{Transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento } Q_{tr,i} \quad 6\,436,48 \quad \text{kWh/ano} \end{aligned}$$

##### E.3 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RENOVAÇÃO DO AR

$$\begin{aligned} &0,024 \\ &x \\ &\text{Número de graus-dias de aquecimento GD} \quad 1\,168 \quad ^\circ\text{C.dias} \\ &x \\ &\text{Coeficiente de transferência de calor por renovação do ar } H_{ve,i} \quad 49,73 \quad \text{W/}^\circ\text{C} \\ &= \\ &\text{Transferência de calor por renovação do ar na estação de aquecimento } Q_{ve,i} \quad 1\,393,84 \quad \text{kWh/ano} \end{aligned}$$

#### E.4 - FACTOR DE UTILIZAÇÃO DE GANHOS

Inércia do edifício	Média	
Ganhos térmicos brutos $Q_{g,i}$	6394,86	kWh/ano
	÷	
Transferência de calor por transmissão e por renovação do ar $Q_{tr,i}+Q_{ve,i}$	7830,32	kWh/ano
	=	
parâmetro $\gamma_i$	0,82	
parâmetro $a_i$	2,60	W/°C
Factor de utilização dos ganhos $\eta_i$	0,79	
	x	
Ganhos térmicos brutos $Q_{g,i}$	6394,86	kWh/ano
	=	
Ganhos totais úteis $Q_{gu,i}$	5057,15	kWh/ano

#### E.5 - NECESSIDADES NOMINAIS ANUAIS DE ENERGIA ÚTIL PARA AQUECIMENTO

Transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento $Q_{tr,i}$	6436,48	kWh/ano
	+	
Transferência de calor por renovação do ar na estação de aquecimento $Q_{ve,i}$	1393,84	kWh/ano
	-	
Ganhos de calor úteis na estação de aquecimento $Q_{gu,i}$	5057,15	kWh/ano
	=	
<i>(folha de cálculo 1.4)</i>		
Necessidades Anuais na estação de aquecimento	2773,17	kWh/ano
	÷	
Área útil de pavimento $A_p$	149,00	m <sup>2</sup>
	=	
Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento $N_{ic}$	18,61	kWh/m <sup>2</sup> .ano

Anexo 2: Folha de cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento

**Folha de Cálculo F**

**NECESSIDADES NOMINAIS ANUAIS DE ENERGIA ÚTIL PARA ARREFECIMENTO**

**F.1 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR**

$$\begin{aligned} &\text{Coeficiente de transferência de calor por transmissão } H_{tr} \quad 229,63 \quad \text{W/}^\circ\text{C} \\ &+ \\ &\text{Coeficiente de transferência de calor por renovação do ar } H_{ve,v} \quad 74,59 \quad \text{W/}^\circ\text{C} \\ &= \\ &\text{Coeficiente de transferência de calor } H_{t,v} \quad 304,22 \quad \text{W/}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

**F.2 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR TRANSMISSÃO**

$$\begin{aligned} &\text{Coeficiente de transferência de calor por transmissão } H_{tr} \quad 229,63 \quad \text{W/}^\circ\text{C} \\ & \quad \times \\ & \quad (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \quad 4 \quad ^\circ\text{C} \\ & \quad \times \\ & \text{Duração da Estação de Arrefecimento } L_v \quad 2928 \quad \text{horas} \\ & \quad \div \\ & \quad 1000 \\ & = \\ & \text{Transferência de calor por transmissão na estação de arrefecimento } Q_{tr,v} \quad 2\,602,04 \quad \text{kWh/ano} \end{aligned}$$

**F.3 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RENOVAÇÃO DO AR**

$$\begin{aligned} &\text{Coeficiente de transferência de calor por renovação do ar } H_{ve,v} \quad 74,59 \quad \text{W/}^\circ\text{C} \\ & \quad \times \\ & \quad (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \quad 4 \quad ^\circ\text{C} \\ & \quad \times \\ & \text{Duração da Estação de Arrefecimento } L_v \quad 2928 \quad \text{horas} \\ & \quad \div \\ & \quad 1000 \\ & = \\ & \text{Transferência de calor por renovação do ar na estação de arrefecimento } Q_{ve,v} \quad 845,22 \quad \text{kWh/ano} \end{aligned}$$

#### F.4 - FACTOR DE UTILIZAÇÃO DE GANHOS

Inércia do edifício	Média	
Ganhos térmicos brutos $Q_{g,v}$	3550,70	kWh/ano
	÷	
Transferência de calor por transmissão e por renovação do ar $Q_{tr,v}+Q_{re,v}$	3447,26	kWh/ano
	=	
parâmetro $\gamma_v$	1,03	
parâmetro $a_v$	2,60	W/°C
Factor de utilização dos ganhos $\eta_v$	0,71	

#### F.5 - NECESSIDADES NOMINAIS ANUAIS DE ENERGIA ÚTIL PARA ARREFECIMENTO

	$(1 - \eta_v)$	0,29	
		x	
Ganhos de calor brutos na estação de arrefecimento $Q_{g,v}$		3550,70	kWh/ano
		÷	
Área útil de pavimento $A_p$		149,00	m <sup>2</sup>
		=	
Necessidades Anuais de Energia Útil na Estação de Arrefecimento $N_{vc}$		6,88	kWh/m <sup>2</sup> .ano

Anexo 3: Cálculo da Energia incorporada em cada material constituinte da fachada com revestimento em madeira

Área		0,1685					
Material	Espessura [m]	Densidade [kg/m3]	kg/m2	EE [MJ/kg]	[MJ/m2]	%EE	MJ
Madeira	0,020	480	9,6	10,00	96	12%	16,176
Telha (ceramic tile)	0,020	1500	30	12,00	360	42%	60,66
Reboco de Cal	0,025	1600	40	1,10	44	5%	7,414
Fardos de palha	0,365	110	40,15	0,24	9,636	1%	1,623666
OSB3	0,018	640	11,52	15,00	172,8	21%	29,1168
Gesso Cartonado	0,024	900	21,6	6,75	145,8	18%	24,5673
					828,236	100%	139,557766

Área		0,0251					
Material	Espessura [m]	Densidade [kg/m3]	kg/m2	EE [MJ/kg]	[MJ/m2]	%EE	MJ
Madeira	0,020	480	9,6	10,00	96	17%	2,4096
Ripado Horizontal	0,020	480	9,6	10,00	96	17%	2,4096
Reboco de Cal	0,025	1600	40	1,10	44	8%	1,1044
Fardos de Palha	0,365	110	40,15	0,24	9,636	2%	0,2418636
OSB3	0,018	640	11,52	15,00	172,8	31%	4,33728
Gesso Cartonado	0,024	900	21,6	6,75	145,8	26%	3,65958
					564,236	100%	14,1623236

Área		0,0186					
Material	Espessura [m]	Densidade [kg/m3]	kg/m2	EE [MJ/kg]	[MJ/m2]	%EE	MJ
Madeira	0,020	480	9,6	10,00	96	17%	1,7856
Ripado Horizontal	0,020	480	9,6	10,00	96	17%	1,7856
Reboco de Cal	0,025	1600	40	1,10	44	8%	0,8184
Fardos de Palha	0,365	110	40,15	0,24	9,636	2%	0,1792296
OSB3	0,018	640	11,52	15,00	172,8	31%	3,21408
Gesso Cartonado	0,024	900	21,6	6,75	145,8	26%	2,71188
					564,236	100%	10,4947896

Área		0,0025					
Material	Espessura [m]	Densidade [kg/m3]	kg/m2	EE [MJ/kg]	[MJ/m2]	%EE	MJ
Madeira	0,020	480	9,6	10,00	96	15%	0,24
Ripado Horizontal	0,020	480	9,6	10,00	96	15%	0,24
Ripado Vertical	0,020	480	9,6	10,00	96	15%	0,24
Reboco de Cal	0,025	1600	40	1,10	44	7%	0,11
Fardos de Palha	0,365	110	40,15	0,24	9,636	1%	0,02409
OSB3	0,018	640	11,52	15,00	172,8	26%	0,432
Gesso Cartonado	0,024	900	21,6	6,75	145,8	22%	0,3645
					660,236	100%	1,65059

		MJ	MJ/Area total ( soma das quatro areas utilizadas)	
1º	OSB	37,10016	172,8	35,26%
2º	Gesso Cartonado	31,30326	145,8	29,75%
3º	Madeira	20,6112	96	19,59%
4º	Reboco de cal	9,4468	44	8,98%
5º	Ripado Horizontal	4,4352	20,65766185	4,22%
6º	Fardos de Palha	2,0688492	9,636	1,97%
7º	Ripado Vertical	0,24	1,117838845	0,23%
			490,0115007	100,00%

Anexo 4: Cálculo da Energia incorporada em cada material constituinte da fachada com revestimento em telha cerâmica

Área 0,1685							
Material	Espessura [m]	Densidade [kg/m3]	kg/m2	EE [MJ/kg]	[MJ/m2]	%EE	MJ
Telha (ceramic tile)	0,02	1500	30	12	360	42,08%	60,66
Reboco de Cal	0,025	1600	40	1,8	72	8,42%	12,132
Fardos de palha	0,365	70	25,55	4	102,2	11,95%	17,2207
OSB3	0,018	650	11,7	15	175,5	20,51%	29,57175
Gesso Cartonado	0,024	900	21,6	6,75	145,8	17,04%	24,5673
					855,5	100,00%	144,15175
Área 0,0251							
Material	Espessura [m]	Densidade [kg/m3]	kg/m2	EE [MJ/kg]	[MJ/m2]	%EE	MJ
Telha (ceramic tile)	0,02	1500	30	12	360	37,83%	9,036
Ripado Horizontal	0,02	480	9,6	10	96	10,09%	2,4096
Reboco de Cal	0,025	1600	40	1,8	72	7,57%	1,8072
Fardos de Palha	0,365	70	25,55	4	102,2	10,74%	2,56522
OSB3	0,018	650	11,7	15	175,5	18,44%	4,40505
Gesso Cartonado	0,024	900	21,6	6,75	145,8	15,32%	3,65958
					951,5	100,00%	23,88265
Área 0,0186							
Material	Espessura [m]	Densidade [kg/m3]	kg/m2	EE [MJ/kg]	[MJ/m2]	%EE	MJ
Telha (ceramic tile)	0,02	1500	30	12	360	37,83%	6,696
Ripado Horizontal	0,02	480	9,6	10	96	10,09%	1,7856
Reboco de Cal	0,025	1600	40	1,8	72	7,57%	1,3392
Fardos de Palha	0,365	70	25,55	4	102,2	10,74%	1,90092
OSB3	0,018	650	11,7	15	175,5	18,44%	3,2643
Gesso Cartonado	0,024	900	21,6	6,75	145,8	15,32%	2,71188
					951,5	100,00%	17,6979
Área 0,0025							
Material	Espessura [m]	Densidade [kg/m3]	kg/m2	EE [MJ/kg]	[MJ/m2]	%EE	MJ
Telha (ceramic tile)	0,02	1500	30	12	360	34,23%	0,9
Ripado Horizontal	0,02	480	9,6	10	96	11,89%	0,24
Ripado Vertical	0,02	480	9,6	10	96	11,89%	0,24
Reboco de Cal	0,025	1600	40	1,8	72	8,92%	0,18
Fardos de Palha	0,365	70	25,55	4	102,2	12,66%	0,2555
OSB3	0,018	650	11,7	15	175,5	21,73%	0,43875
Gesso Cartonado	0,024	900	21,6	6,75	145,8	18,06%	0,3645
					807,5	100,00%	2,01875
		MJ	MJ/Area total ( soma das quatro areas utilizadas)				
1º	Telha (ceramic tile)	77,292		360		46,04%	
2º	OSB	37,15713		173,065347		22,13%	
3º	Gesso cartonado	31,30326		145,8		18,65%	
4º	Reboco de cal	15,4584		72		9,21%	
5º	Ripado Horizontal	4,4352		20,65766185		2,64%	
6º	Fardos de Palha	1,9949148		9,291638565		1,19%	
7º	Ripado Vertical	0,24		1,117838845		0,14%	
				781,9324863		100,00%	

Anexo 5: Energia e CO<sub>2</sub> incorporados na parede de alvenaria dupla

Ref.	Material	Homogeneous?	Thickness [m]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Unit. Embod. En. EE <sub>u</sub> [MJ/kg]	Unit. Embod. C. EC <sub>u</sub> [kgCO <sub>2</sub> e/kg]
<b>EXT</b>						
1	Revestimento exterior (reboco-plaster)	▼	0,015	900	1,80	0,390
2	Alvenaria de Tijolo (11cm)(common brick)	▼	0,110	1100	3,00	0,240
3	Isolante Térmico(Expanded polysterene)	▼	0,040	15	88,60	3,290
4	Alvenaria de Tijolo (15cm)	▼	0,150	1100	3,00	0,240
5	Revestimento Interior (reboco-plaster)	▼	0,015	900	1,80	0,390

**EES**  
Sup. Emb. En. **960**  
[MJ/m<sup>2</sup>]

**ECs**  
Sup. Emb. C. **81**  
[kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>]

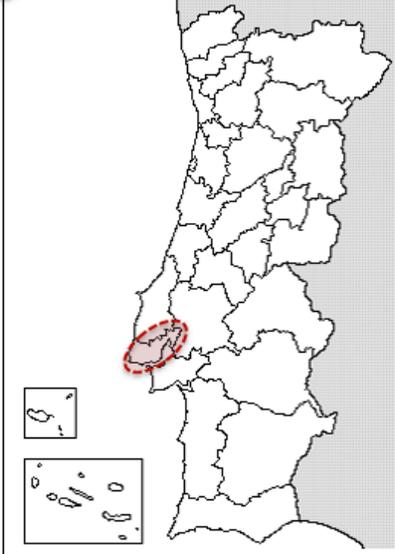
Anexo 6: Folha de cálculo “Anos meteorológicos de referência para simulação dinâmica”

**Anos Meteorológicos de Referência para simulação dinâmica**  

versão 1.05 (13 fevereiro 2014)

Seleção por município

*i* Sintra



*i* preparar ficheiro

EPW (formato EnergyPlus Weather)

**Zona climática**

NUTS 3: Grande Lisboa  
Latitude: 38.9 °N (nominal)  
Longitude: 9.2 °W (nominal)  
Altitude: 109 m (referência)

**Local específico**

Município: Sintra  
*i* Altitude: 165 m

**Dados climáticos**

	Referência	Neste local
<b>Estação de aquecimento</b>		
Período:	5.3	5.5 meses
T média:	10.8	10.6 °C
Graus-dia:	1071	1166 °C
<b>Estação de arrefecimento</b>		
T média:	21.7	21.1 °C

**Zonas de verão e inverno**

V 2 I 1