



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Análise da eficiência energética de coberturas verdes em edifícios residenciais

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

Cláudio André Bernardino Novo

Orientador

Prof.^a Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio

Prof. Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2016

AGRADECIMENTOS

Expresso a minha gratidão a toda a minha família, principalmente aos meus pais que sempre me ajudaram e me proporcionaram meios para poder estudar e seguir aquilo que sempre ambicionei. À minha mãe, Cristina Bernardino por estar sempre presente e ajudar-me a superar todas as etapas ao longo do meu percurso académico e a nível pessoal, e ao meu pai, António Marques Novo, que apesar de já não estar presente será sempre uma referência como profissional e pessoa que foi.

Agradeço à professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio e ao Professor Doutor Fernando Antunes dos Santos, pelo acompanhamento, conhecimento, paciência e disponibilidade manifestados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores que ao longo destes anos contribuíram para a minha formação académica e como pessoa.

A todos os meus amigos que sempre estiveram presentes ao longo da minha vida, sempre me apoiaram, ajudaram e motivaram.

Por fim, à minha namorada, Inês Prata, por todo o apoio, atenção, carinho e compreensão demonstrados desde o momento em que a conheci.

RESUMO

A preocupação ambiental devido ao uso excessivo de combustíveis fósseis aliado ao perigo de extinção deste tipo de recurso tem motivado a adoção de medidas que permitam obter um melhor aproveitamento da energia consumida, assim como alternativas viáveis a estes recursos de modo a reduzir os impactos ambientais inerentes destas fontes energéticas.

Com o intuito de reduzir o desperdício energético existente no setor da construção, a União Europeia criou a Diretiva 2012/27/EU relativa ao desempenho energético de edifícios que, entre muitas medidas, estabelece limites de consumo energético quase nulo para 2020 por parte de edifícios novos e renovados. Uma das opções que permite cumprir estas metas são as soluções passivas aplicadas a edifícios, que visam medidas que permitem obter um consumo energético quase nulo através do uso inteligente de técnicas construtivas aperfeiçoadas ao longo dos anos.

Atualmente existem vários estudos sobre medidas passivas e a influência de diversos fatores no desempenho energético dos edifícios, proporcionando a cada dia que passa a obtenção de melhores resultados para este tipo de solução. No entanto, ainda existem poucos estudos que mostram as poupanças relativas ao consumo energético de edifícios através do uso de coberturas verdes numa solução passiva viável.

Ao longo do trabalho são ainda abordados os benefícios ambientais deste tipo de solução e serão apresentados alguns resultados de trabalhos efetuados nesta área que corroboram os benefícios energéticos deste tipo de solução quando comparado com um telhado convencional aplicado num edifício residencial, submetido a diferentes condições climáticas.

Por fim o objetivo final deste trabalho passa por comparar os resultados obtidos para vários tipos de coberturas verdes, com o auxílio do programa de simulação energética *EnergyPlus*, através da variação das características das camadas constituintes do mesmo, variação da altura das plantas, índice de área de folhas (*Leaf Area Index*) e a espessura do substrato. Tendo sempre em foco a procura pela solução que proporciona maiores ganhos energéticos a uma moradia residencial localizada na zona de Coimbra (clima Csb). É também efetuado um estudo comparativo entre este tipo de coberturas, uma cobertura tradicional escura e uma clara, e realizada uma análise do comportamento energético destas mesmas soluções para um clima médio Csa.

Palavras-chave: Solução passiva, *EnergyPlus*, Cobertura verde, Desempenho energético, Edifícios residenciais, Construção em *LSF*.

ABSTRACT

Environmental concern due to excessive use of fossil fuels together with the risk of depletion of this type of resource has motivated the adoption of measures to achieve a better use of energy consumed as well as viable alternatives to these resources in order to reduce the related environmental impacts of these kind of energy sources.

In order to reduce the waste energy consumption in the construction sector, the EU has published Directive 2012/27 / EU on the energy performance of buildings, which, among many measures, sets target to almost zero energy consumption for 2020 by new and renovated buildings. One of the options to comply with these goals are the passive solutions applied to buildings, which are aimed at measures that allow almost zero energy consumption through intelligent use of construction techniques improved over the years.

Currently there are several studies on passive measures and of the influence of various factors on the energy performance of buildings, leading to better results for this type of solution. However, there are few only a studies that show that savings on the energy consumption of buildings through the use of green roofs is a reliable solution.

Throughout this work the environmental benefits of this type of solution are also addressed and results of this work support the energy benefits of this type of solution when compared to a conventional roof applied in a residential building, under different weather conditions.

Finally, the ultimate goal of this work is to compare the results obtained for several types of green roofs with the aid of EnergyPlus simulation program, by varying the characteristics of the constituent layers such as, plant height variation, Leaf Area Index (LAI) and the thickness of the soil. Keeping in focus the search for the solution providing the best energy savings for a house located in the zone of Coimbra (climate Csb). A comparative study of this type of roof, a traditional black roof and light roof will be carried out taking into account an average climate Csa.

Keywords: passive solution, EnergyPlus, green roof, energy performance, residential buildings, *Light Steel Framing (LSF)*

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento do tema	1
1.2	Motivação e objetivos	4
1.3	Estrutura da dissertação	5
2	CASAS PASSIVAS	6
2.1	Introdução.....	6
2.2	Revisão Histórica.....	7
2.2.1	Norma “Passivhaus”	9
2.3	Desenvolvimento em Portugal	12
3	COBERTURAS VERDES	14
3.1	Introdução.....	14
3.2	Revisão Histórica.....	15
3.3	Características de uma cobertura verde padrão	15
3.4	Benefícios comparativamente a coberturas tradicionais	17
3.5	Eficiência energética.....	19
3.5.1	Importância das camadas de vegetação e substrato em diferentes climas.....	19
3.5.2	Desempenho do isolamento térmico em diferentes coberturas verdes.....	20
3.5.3	Diferenças entre um solo com e sem sistema de irrigação no verão e importância da área de vegetação.....	20
3.5.4	Importância da camada de drenagem	21
3.5.5	Poupanças energéticas	21
3.6	Contribuição para uma solução passiva.....	23
4	ENQUADRAMENTO DO CASO DE ESTUDO	24
4.1	Construção modular em Light Steel Framing (LSF).....	24
4.2	Modelo inicial.....	25
4.3	Condições climáticas	28
4.4	EnergyPlus.....	32
4.5	Coefficiente de transmissão térmica e evapotranspiração	35
5	CASO DE ESTUDO	36
5.1	Introdução.....	36
5.2	Descrição dos parâmetros base do modelo.....	37
5.3	Características das coberturas consideradas	38
5.4	Análise dos tipos de irrigação.....	41

5.5 Análise energética das diferentes coberturas.....	42
5.5.1 Temperatura da superfície exterior da cobertura no verão	42
5.5.2 Consumo energético: Verão e Inverno	45
5.5.3 Consumo energético anual	47
5.5 Estudo paramétrico	48
5.6 Análise para a região climática Csa.....	49
6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	54
6.1 Conclusões.....	54
6.2 Desenvolvimentos Futuros	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Indicadores de evolução entre 1991 – 2012 (Figueiredo, 2016).....	1
Figura 1.2 – Dependência energética na UE-28 em 2013 (Eurostat@, 2015)	2
Figura 1.3 – Consumo de energia final por setor em 2004 e em 2013 (DGEG, 2013)	3
Figura 2.1 – Primeiro edifício <i>Passivhaus</i> em Darmstadt Kranichstein, southern side (Passiv@, 2015).....	7
Figura 2.2 - Princípios base da casa passiva (Passivehouse@, 2016b).....	10
Figura 2.3 – Comparação dos gastos com aquecimento (vermelho) e arrefecimento (azul) de uma casa típica e de uma passiva (Passive-On Project, 2007a)	12
Figura 2.4 – Energia consumida por região (Figueiredo <i>et al.</i> , 2016).....	13
Figura 2.5 - <i>Passivhaus</i> de Ílhavo (Passivhaus@, 2015)	13
Figura 3.1 – Camadas típicas de uma cobertura verde (Restora@, 2016)	16
Figura 3.2 – Comportamento de uma cobertura verde (linha a tracejado) e de uma cobertura tradicional (linha contínua) de um dado evento chuvoso (Berndtsson, 2010)	17
Figura 3.3 – Variação da temperatura causada pelo fenómeno <i>Ilha de Calor</i> (Retzlaff <i>et al.</i> , 2011).....	18
Figura 3.4 – Fases de crescimento de uma cobertura extensiva: “a” durante o primeiro verão (2011), “b” período de Inverno (2011-2012) e “c” Verão de 2012 (Coma <i>et al.</i> , 2016).....	21
Figura 3.5 – Energia necessária para aquecimento e arrefecimento (Silva <i>et al.</i> , 2016).....	22
Figura 3.6 – Energia necessária de aquecimento “a” e arrefecimento “b” para diferentes coberturas (Silva <i>et al.</i> , 2016).....	22
Figura 4.1 – Capacidade de adaptação da construção modular (coolhaven@, 2016)	24
Figura 4.2 – Moradia <i>CoolHaven</i>	25
Figura 4.3 – Modelo computacional representativo da moradia <i>CoolHaven</i>	25
Figura 4.4–Planta piso 0 da moradia <i>CoolHaven</i> (modelo)	26
Figura 4.5–Planta piso 1 da moradia <i>CoolHaven</i> (modelo)	26
Figura 4.6 – Pormenor construtivo e propriedades da cobertura do piso 1	27
Figura 4.7 – Pormenor construtivo e propriedades da fachada exterior.....	27
Figura 4.8 – Mapa climático da Península Ibérica segundo Köppen-Geiger (AEmet, 2000) ..	28
Figura 4.9 – Temperatura média diária (<i>Software</i>).....	29
Figura 4.10–Temperatura média mensal (<i>software</i>) e 2015 (Clima@, 2016).....	30
Figura 4.11 – Velocidade do vento e Temperatura exterior: semana de projeto de Inverno....	30
Figura 4.12 –Radiação solar: semana de projeto de Inverno.....	30
Figura 4.13 – Velocidade do vento e Temperatura exterior: semana de projeto de Verão	31

Figura 4.14 – Radiação solar: semana de projeto de Verão	31
Figura 4.15 – Temperatura exterior Verão “a” e Inverno “b”	31
Figura 4.16 – Balanço energético de uma cobertura verde (Sailor <i>et al.</i> , 2012)	32
Figura 5.1 – Temperatura para a semana de projeto de Verão	37
Figura 5.2 – Temperatura para a semana de projeto de Inverno	37
Figura 5.3 – Características da cobertura escura	38
Figura 5.4 – Características da cobertura verde extensiva	39
Figura 5.5 – Modelo computacional representativo da moradia <i>CoolHaven</i> para o estudo de uma cobertura verde	40
Figura 5.6 – Consumo de energia de arrefecimento durante a semana de projeto de Verão ...	41
Figura 5.7 – Consumo de energia de aquecimento durante a semana de projeto de Inverno ..	42
Figura 5.8 – Temperatura exterior da cobertura de referência: semana de projeto de verão ...	43
Figura 5.9 – Temperatura exterior da cobertura escura: semana de projeto de verão	43
Figura 5.10 – Temperatura exterior da cobertura extensiva: semana de projeto de verão	44
Figura 5.11 – Temperatura exterior da cobertura semi-intensiva: semana de projeto de verão	44
Figura 5.12 – Temperatura exterior da cobertura intensiva: semana de projeto de verão	44
Figura 5.13 – Consumo de energia: semana de projeto de Verão	45
Figura 5.14 – Consumo de energia: semana de projeto de Inverno	46
Figura 5.15 – Consumo de energia mensal das diferentes soluções	47
Figura 5.16 – Consumo de energia anual das diferentes soluções	47
Figura 5.17 – Consumo de energia através da variação da altura das plantas	48
Figura 5.18 – Consumo de energia através da variação de <i>LAI</i>	49
Figura 5.19 – Velocidade do vento e Temperatura exterior: semana de projeto de Inverno (clima Csa)	50
Figura 5.20 – Radiação solar: semana de projeto de Inverno (clima Csa)	50
Figura 5.21 – Velocidade do vento e Temperatura exterior: semana de projeto de Verão (clima Csa)	50
Figura 5.22 – Radiação solar: semana de projeto de Verão (clima Csa)	51
Figura 5.23 – Consumo de energia: semana de projeto de Inverno (clima Csa)	51
Figura 5.24 – Consumo de energia: semana de projeto de Verão (clima Csa)	51
Figura 5.25 – Consumo de energia mensal das diferentes soluções (clima Csa)	52
Figura 5.26 – Consumo de energia anual das diferentes soluções (clima Csa)	53

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Custo inicial de uma casa típica e " <i>Passivhaus</i> " (Passive-On Project, 2007a) ..	10
Quadro 2.2 – Custo do ciclo de vida e período de retorno (Passive-On Project, 2007c)	11
Quadro 5.1 – Características das diferentes coberturas verdes consideradas.....	39
Quadro 5.2 – Características das camadas exteriores das diferentes coberturas	40
Quadro 5.3 – Temperaturas extremas na superfície das coberturas: semana de projeto de verão	45
Quadro 5.4 – Casos analisados com variação da altura das plantas e <i>LAI</i>	48

SIMBOLOGIA

- F_t – Fluxo de calor na vegetação [W/m^2]
 F_g – Fluxo de calor na superfície do solo [W/m^2]
 H_g – Fluxo de calor sensível do solo [W/m^2]
 H_f – Evapotranspiração da folhagem [W/m^2]
 L_g – Fluxo de calor latente do solo [W/m^2]
 L_f – Fluxo de calor por convecção da folhagem [W/m^2]
 I_s – Radiação total do comprimento de onda curta [W/m^2]
 I_{ir} – Radiação total do comprimento de onda longa [W/m^2]
 α_f – Albedo da folhagem
 ε_f – Emissividade da folhagem
 ε_g – Emissividade do solo
 ε_1 – Relação entre a emissividade da folhagem e do solo
 T_f – Temperatura da folhagem [Kelvin]
 T_g – Temperatura do solo [Kelvin]
 σ – Constante de Stefan – Boltzmann [$5.67 \times 10^{-8} \text{ w}/\text{m}^2 \text{ K}^4$]
 LAI – (*Leaf Area Index*) [m^2/m^2]
 K – Condutibilidade térmica do solo [$\text{W}/(\text{mK})$]
 z – Profundidade do solo [m]
 U – Coeficiente de transmissão térmica [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$]

ABREVIATURAS

IEA – *International Energy Agency*

UE – União Europeia

PHPRP – *Passive House Preparatory Research Project*

PHI – *Passive House Institute*

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*

LCCA – *Life-cycle Cost Analysis*

LAI – *Leaf Area Index*

LSF – *Light Steel Framing*

ETICS – *External Thermal Insulation Composite System*

XPS – *Extrude Polystyrene*

OSB – *Oriented Strand Board*

IWEC – *International Weather for Energy Calculation*

Csa – Clima temperado húmido/mediterrâneo com Verão seco e quente

Csb – Clima temperado húmido/mediterrâneo com Verão seco e temperado

AEmet – Agência Estatal de Meteorologia

IM – Instituto de Meteorologia

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

A necessidade de se procurarem novas soluções que permitam alcançar uma melhor eficiência energética comparativamente aos hábitos construtivos habitualmente utilizados, surge na busca por uma redução de consumo e de desperdício de energias não renováveis. Esta dependência energética levou a que fossem estudadas alternativas de modo a atenuar a escassez destes recursos uma vez que se tratam de recursos limitados.

Por outro lado, de modo a restaurar o equilíbrio do planeta e alterar o paradigma atual em relação a hábitos energéticos no ramo da construção, têm sido implementadas medidas que visam alcançar um crescimento sustentável através do uso de fontes energéticas renováveis. No entanto com o crescimento da população, esta tarefa tem-se tornado cada vez mais difícil de alcançar.

Os últimos estudos efetuados pela “*International Energy Agency*” (IEA) mostram que a população sofreu um crescimento de 30% entre 1991 e 2012, e com este verificou-se o aumento de emissões CO₂ e consumo de energia (Figueiredo, 2016), conforme ilustrado na Figura 1.1.

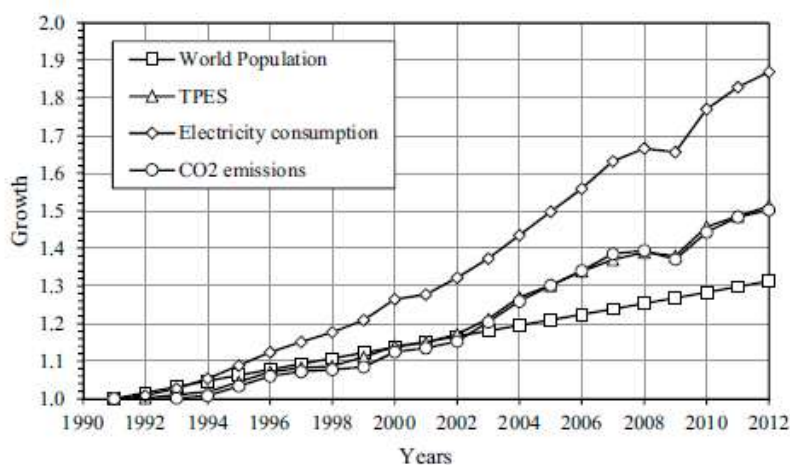


Figura 1.1 – Indicadores de evolução entre 1991 – 2012 (Figueiredo, 2016)

Estima-se ainda que o setor dos edifícios é um dos que mais energia consome em todo o planeta, consumindo valores próximos dos 40% de toda a energia produzida. A redução deste consumo energético é agora uma prioridade para os países membros da União Europeia, tendo vindo a

ser desenvolvidas inúmeras soluções que ajudam a combater a dependência de energias não renováveis.

Para além de ser um dever cívico, a partir de 2020 reduzir o consumo energético será uma obrigação pois a União Europeia, em articulação com os compromissos a nível mundial, desenvolveu a Diretiva 2012/27/EU do parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de Outubro de 2012, relativa à eficiência energética (Diretiva 2012/27/EU, 2012). Estas medidas permitem à União Europeia cumprir o Protocolo de Quioto de modo a honrar o seu compromisso a longo prazo de manter a subida da temperatura abaixo dos 2 °C, para além do seu compromisso de reduzir até 2020 as emissões de gases poluentes com efeito de estufa. A principal medida passa por estabelecer metas de necessidades energéticas quase nulas a partir de 2020 para todos os edifícios novos ou renovados. Estes limites energéticos ficam, no entanto, ao critério de cada Estado-Membro, podendo depender da zona em que a construção se insere.

A Diretiva 2017/27/EU estabelece ainda metas relativas a consumos energéticos, tendo como objetivo a redução em 20% de emissões de gases que contribuem para o efeito de estufa, a redução do consumo energético em 20% e o aumento da produção de energia através de fontes renováveis também em 20%, até ao ano 2020 (Europa@, 2016).

Segundo um estudo efetuado pela Eurostat (Eurostat@, 2015), Portugal é o 8º país, pertencente à União Europeia, com a maior dependência energética exterior, tal como se pode verificar na Figura 1.2.

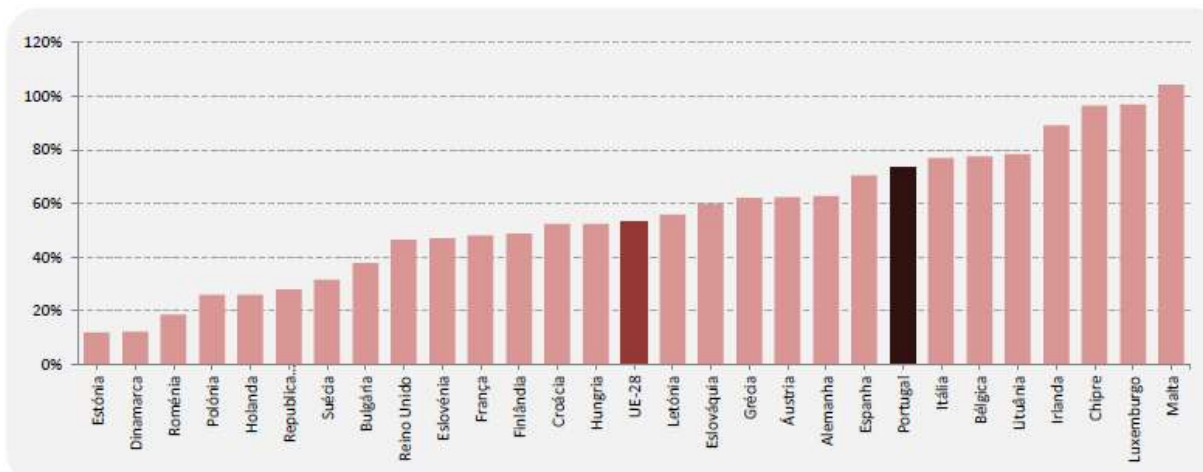


Figura 1.2 – Dependência energética na UE-28 em 2013 (Eurostat@, 2015)

Portugal sempre foi um país com elevada taxa de dependência energética do exterior devido à escassez de produção de energia fóssil em território nacional. Como tal, é de grande importância conseguir um melhor aproveitamento energético assim como criar fontes de energias renováveis. No ano 2000, Portugal tinha uma dependência energética de 85.7%, em 2013, os

últimos dados mostram que esta dependência se encontra nos 73.9%, estando esta redução associada em parte ao aumento da produção hídrica e eólica (DGEG, 2013).

A Figura 1.3 mostra o peso de cada setor relativamente ao consumo energético em Portugal para os anos 2004 e 2013. Nesta figura, verifica-se que existem dois setores que se destacam, são eles o dos transportes e indústria, seguindo-se o setor doméstico, serviços e por fim, com um impacto muito menor, o setor de agricultura e pescas.



Figura 1.3 – Consumo de energia final por setor em 2004 e em 2013 (DGEG, 2013)

Diminuir a necessidade de consumo energético, ou seja, diminuir o desperdício energético é uma forma de alcançar os objetivos estabelecidos pela regulamentação Europeia já mencionada. Um modo eficaz de reduzir as perdas energéticas no setor de consumo doméstico passa pela adoção de edifícios de baixo consumo energético ou passivos. A casa passiva destaca-se pelo seu sistema passivo de aquecimento e arrefecimento permitindo manter uma temperatura interior dentro dos parâmetros de conforto. Estes sistemas usam tecnologias construtivas integradas nos edifícios desde a fase de conceção do projeto, destacando-se ainda a sua capacidade para ter sistemas próprios que permitam gerar energia aproveitando fontes renováveis.

De modo a diminuir as necessidades energéticas de um modelo numérico que simula um edifício residencial com boa eficiência energética já existente, *CollHaven*, foi estuada a influência de uma cobertura verde numa solução deste género de forma a melhorar o comportamento térmico da cobertura do modelo e de certo modo melhorando os índices ambientais da envolvente em que está inserida.

1.2 Motivação e objetivos

A presente dissertação tem como objetivo inicial dar a conhecer os benefícios em termos de consumos energéticos que uma solução passiva proporciona em relação aos métodos construtivos usualmente utilizados, e posteriormente, estudar como uma cobertura verde influencia o consumo energético de um edifício residencial unifamiliar.

Numa primeira fase será abordado a evolução que este conceito “Passivo” sofreu até aos dias de hoje em que é considerado por muitos uma solução ideal para diminuir a dependência energética que se tem verificado. Será dado especial destaque à norma alemã “*Passivhaus*”, à sua posterior expansão Europeia e respetivas adaptações.

Posteriormente será abordado o desenvolvimento histórico das coberturas verdes e as adaptações que este método construtivo tem vindo a sofrer, assim como a sua utilidade em termos de eficiência energética e os seus variadíssimos benefícios para com o meio envolvente. Sendo também apresentados alguns estudos nesta matéria que apresentam resultados em termos de eficiência energética muito satisfatórios, revelando-se uma solução a ter em conta a quando da conceção estrutural de um edifício tradicional.

Por último será efetuado uma análise do desempenho térmico de uma habitação já existente em Coimbra, embora não seja uma solução totalmente passiva destaca-se pelo seu bom desempenho térmico. Esta habitação tem sido alvo de estudo de vários trabalhos desenvolvidos com o apoio do Departamento de Engenharia Civil de Coimbra e como tal já existe um modelo virtual que foi adaptado a esta solução. Este modelo foi desenvolvido através do *software Design Builder* (Design@, 2016), que em conjunto com o *software EnergyPlus* (Energy@, 2016), usado para simular o comportamento energético, permitirá analisar as diferentes soluções em termos de consumos energéticos. De referir ainda que este modelo foi devidamente adaptado para que o estudo energético tenha em consideração a utilização de uma cobertura verde.

Assim, os objetivos deste trabalho passam por: analisar diferentes tipos de coberturas verdes, alterando parâmetros como a altura do solo, altura das plantas e o índice de área das folhas (*Leaf Area Index*); analisar o comportamento térmico perante diferentes condições meteorológicas a que estará sujeita ao longo do ano; analisar a importância de sistemas de irrigação e estudar o seu impacto na estação de aquecimento e de arrefecimento; estudar a importância da camada da vegetação e sua utilidade para diminuir a temperatura exterior da cobertura; analisar o comportamento das diferentes coberturas verdes para diferentes climas em Portugal.

1.3 Estrutura da dissertação

Neste primeiro capítulo é feito um enquadramento do tema, onde é abordado o cenário atual sobre o consumo energético atual e os efeitos graves no quotidiano que esta má gestão tem vindo a agravar. São também expostos os objetivos deste trabalho e a organização da presente dissertação.

O segundo capítulo descreve o desenvolvimento da construção passiva, em que consiste este método construtivo, quais os pilares que servem de base para este conceito, e faz-se ainda referência a alguns casos de importante relevância para o aperfeiçoamento desta técnica ao longo dos anos.

O terceiro capítulo introduz a matéria abordada no caso de estudo, caracteriza as coberturas verdes tipicamente utilizadas e os benefícios associados ao seu uso. Na parte final deste capítulo, são apresentados alguns estudos efetuados neste âmbito que corroboram os benefícios que esta solução permite obter nos ramos: energético e ambiental.

O quarto capítulo será reservado ao enquadramento do caso de estudo onde se abordam as noções básicas a ter em consideração no desenvolvimento prático do tema. Será explicado: o modelo adotado; o clima considerado; e os processos físicos envolventes no estudo da eficiência energética de uma cobertura verde.

O quinto capítulo está reservado para a análise do caso de estudo através de um modelo onde são implementadas várias coberturas verdes num edifício residencial situado em Coimbra, submetido a um clima Cbs, onde se analisa a eficiência energética global do edifício, ainda é estudada a capacidade térmica das mesmas e os ganhos energéticos adjacentes para cada solução considerada. Posteriormente será estudada a eficiência energética desse mesmo modelo quando submetido a condições climáticas típicas das zonas mais a sul de Portugal, clima Csa. Por fim será realizada uma análise paramétrica que permitirá perceber como varia o desempenho da cobertura verde através da variação das características da camada de vegetação.

O último capítulo destina-se à apresentação das conclusões das várias soluções estudadas, reservando-se ainda espaço para a discussão das perspetivas para o futuro do setor da construção e da utilidade da aplicação deste conceito na busca por um crescimento mais sustentável.

2 CASAS PASSIVAS

2.1 Introdução

A constante evolução e expansão da humanidade levaram a que se criassem padrões muito elevados de comodidade sem ser considerado o equilíbrio ambiental do planeta. Com o passar dos anos este equilíbrio tem sido cada vez mais afetado, pois desenvolveu-se um modo de vida tal, que muitas vezes não é tido em consideração o uso racional da energia, da sustentabilidade da construção e de evolução, levando a que se agrave cada vez mais os problemas ambientais.

Através do uso de combustíveis fósseis, surge o aparecimento de vários aparelhos mecânicos desenvolvidos com o propósito de aumentar a comodidade das pessoas no dia-a-dia, sendo o aquecimento, iluminação, sistemas de climatização os grandes responsáveis neste campo. O clima exterior deixou assim de ser o tema mais preocupante, uma vez que agora existem métodos que permitem conseguir a temperatura desejável no interior do edifício, através de sistemas de climatização, independentemente das condições climatéricas exteriores.

No entanto, de modo a cumprir todos os requisitos impostos pela Diretiva já mencionada, foi necessário criar uma nova ideia mais sustentável do ponto de vista económico e ambiental, e assim surgiu um novo interesse por uma ideologia construtiva criada na década de 90, o conceito “*Passivhaus*”. Este conceito aponta algumas medidas que possibilitam a redução do consumo energético através de limites de consumo estipulados mediante a zona em que se insere. As medidas passivas a adotar devem ter sempre em conta a tipologia construtiva mais produtiva para essa zona (Almeida, 2013)

Neste tipo de construção o isolamento é um dos elementos de maior importância. Este permite reduzir as perdas de calor, diminuindo a necessidade de aquecimento no Inverno, e juntamente com uma boa ventilação nos períodos mais frescos do dia, ajuda a reduzir a necessidade de arrefecimento no verão, pois o isolamento irá reduzir a transferência de energia com o exterior nos períodos mais quentes do dia, permitindo manter o edifício a uma temperatura amena.

Ao longo do trabalho será dada mais importância à capacidade de transferência de energia através da zona da cobertura, pois o caso de estudo procura estudar principalmente a eficiência energética que uma cobertura verde proporciona a uma moradia.

2.2 Revisão Histórica

Apesar deste tema ser algo recorrente nos dias de hoje, isso não se verificava no passado, no entanto sempre foram tomadas medidas nesta matéria. No entanto, sempre foram usados diferentes métodos construtivos dependendo da localização da casa, muito devido às condições climáticas existentes em cada local. Por exemplo, para uma casa localizada: a sul da Europa pintavam-se as casas com cores claras, refletindo os raios solares; a norte da Europa orientava-se a fachada mais importante para sul e criava-se mais espaços que possibilitassem a entrada de raios solares na casa, já que as temperaturas são mais baixas e será necessário um maior aproveitamento do meio envolvente de modo a ter um maior ganho de energia exterior.

O conceito “*Passivhaus*” foi criado em 1988, pelos Professores Bo Adamsson (*Lund University*, Suécia) e Wolfgang Feist (*Institut fur Umwelt und Wohnen*, Alemanha). Em 1990 com o apoio de uma equipa de cientistas que participava no programa *Passive House Preparatory Research Project (PHPRP)*, surge o primeiro edifício *Passivhaus*, situado em Darmstadt, Alemanha. O consumo de energia deste edifício registou uma poupança na ordem dos 90% em comparação com o uso energético verificado nas casas tradicionais da época da mesma zona (Passiopedia@, 2016).



Figura 2.1 – Primeiro edifício *Passivhaus* em Darmstadt Kranichstein, southern side (Passiv@, 2015)

Com o passar dos anos foram surgindo mais casas que seguem este conceito, sendo possível constatar que as medidas tomadas na primeira casa passiva construída ainda hoje são viáveis e permitem obter ganhos energéticos muito similares aos da época. No entanto, em comparação com as casas construídas atualmente, a percentagem de poupança energética que estas medidas atingem, ronda os 75%. Esta diminuição na poupança energética entre os dois métodos construtivos deve-se, em grande parte, à evolução do sector construtivo e dos materiais utilizados em obra, permitindo alcançar poupanças energéticas mesmo sem serem tomadas medidas passivas (Passiopedia@, 2016).

Uma das organizações mais respeitadas e conceituadas neste assunto é a *Passive House Institute (PHI)*, que desde o começo teve um papel crucial no seu desenvolvimento. É também uma das poucas organizações internacionalmente reconhecidas que estuda a performance energética dos edifícios. Esta organização designa o conceito casa passiva como sendo uma alternativa aos métodos construtivos atuais, destacando-se (Passive@, 2016):

- A nível energético uma redução de 90% em energias de aquecimento e arrefecimento em comparação com um edifício tradicional, e 75 % em comparação com um edifício recente.
- Pelo seu alto nível de conforto;
- A nível estrutural pelo uso de janelas e paredes equipadas com um bom isolamento, assim como o uso de coberturas e lajes capazes de manter o equilíbrio térmico em todo o edifício (Passive@, 2016).

Para além do desenvolvimento de técnicas de apoio para a redução da necessidade de consumo de energia, também se desenvolveram soluções economicamente mais equilibradas do ponto de vista construtivo. Atualmente uma casa construída segundo a norma “*Passivhaus*” custa no máximo mais 10% que uma casa típica, sendo que estes custos estão relacionados com o local onde se insere a obra. Os últimos dados mostram que uma construção submetida ao clima verificado na zona portuguesa terá custos em média 4-6% mais elevados que a alternativa habitualmente utilizada, no entanto, o retorno financeiro devido aos ganhos energéticos ao longo dos anos irá compensar este investimento inicial (Passive-On Project, 2007b).

Esta procura por alternativas aos métodos construtivos habitualmente utilizados surge no seguimento das recentes regulamentações Europeias que visam que a partir de 2020 todos os edifícios novos e as intervenções nos existentes terão de ter necessidades de energia quase nula. Esta exigência é feita pela Diretiva Europeia para o Desempenho Energético dos Edifícios (*EPBD*) e está em vigor desde 2010 (Cardoso e Ascenso, 2011).

2.2.1 Norma “*Passivhaus*”

Inicialmente desenvolvido na Alemanha, a expansão da norma alemã, considerada ainda hoje a mais importante a nível europeu, teve de ser adaptada de modo a ser possível aplicar este conceito aos vários climas dos países Europeus. Atualmente vários países possuem legislações próprias para casas passivas, como é o caso da Dinamarca, Suíça e Áustria (Cardoso e Ascenso, 2011).

A norma “*Passivhaus*” baseia-se essencialmente no estabelecimento de limites para o consumo de energia para climatização e em manter um bom ambiente interior, em termos de temperatura de conforto e qualidade do ar (Passive-On Project, 2007b).

Um edifício pode ser classificado como “*Passivhaus*” a partir do momento que cumpra todos os requisitos exigidos por uma entidade certificada. Para os climas quentes da Europa (ex. Portugal, Espanha, Itália e Grécia) o consórcio “Passive-On” elaborou um estudo que visa a adaptação da norma “*Passivhaus*” a estas zonas, permitindo às agências certificadas adaptar as medidas a aplicar, consoante o local em estudo (Cardoso e Ascenso, 2011).

Para efeitos de certificação, o estudo desenvolvido pelo “Passive-On”, estabelece algumas medidas em termos de limites de energia consumida, por exemplo, o consumo de energia de todos os equipamento elétricos não deverá exceder o limite de 120 kWh (m² ano) de área útil, e em caso de existir a necessidade de aquecimento ou arrefecimento estes não podem exceder o limite de 15 kWh/(m² ano). Deve também ser efetuado um teste de pressurização (a 50 Pa) na envolvente do edifício de acordo com a norma EN13829, em que o resultado não deve exceder trocas de ar com o exterior de 0,6 (*rate per hour*) rph⁻¹. A temperatura interior no Inverno deve ser mantida acima dos 20 °C, e no Verão, deve permanecer dentro do intervalo de conforto definida na norma EN15251 (Passive-On Project, 2007a).

O correto uso dos 5 princípios ilustrados na Figura 2.2 possibilitará grandes reduções energéticas, conseguindo-se assim obter valores dentro dos limites definidos pelas instituições certificadas já mencionadas. Estas medidas passam por: um correto uso de isolamento térmico; melhorar a impermeabilidade do edifício; ter sistemas de ventilação eficazes; conseguir ganhos de energia passivos; prevenção de pontes térmicas (Passivehouse@, 2016).

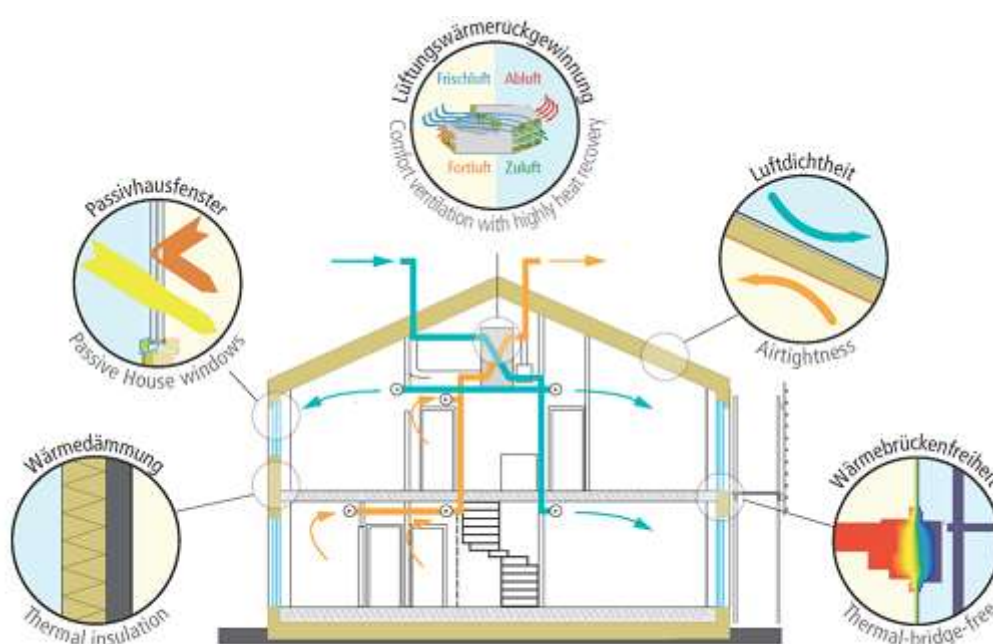


Figura 2.2 - Princípios base da casa passiva (Passivehouse@, 2016b)

O projeto “Passive – On” estudou ainda a viabilidade das casas passivas a nível financeiro, comparando os custos de construção de uma casa passiva com uma casa típica, para os diferentes climas Europeus. Este estudo do custo inicial de um edifício típico foi realizado tendo em conta dados governamentais e de relatórios estatísticos da indústria, referente aos custos para cada local. O quadro 2.1 apresenta os custos médios de construção de casas típicas e os custos do investimento inicial extra das soluções passivas otimizadas para os diferentes climas.

Quadro 2.1 – Custo inicial de uma casa típica e “Passivhaus” (Passive-On Project, 2007a)

País	Casa típica	Passivhaus	Custos	Custos Extras
	[€/m ²]	[€/m ²]	Extras [€/m ²]	[%]
França	1100	1203	103	9
Alemanha	1400	1494	94	6.71
Itália	1200	1260	60	5
Espanha (Granada)	720	744.1	24.1	3.35
Espanha (Sevilha)	720	740.5	20.5	2.85
Reino Unido	1317	1390	73	5.54

Conclui-se que o custo inicial extra é superior para os climas mais frios, principalmente devido à maior necessidade de isolamento nestes locais. Para os climas quentes da Europa, o investimento extra ronda os 3-5%, muito abaixo dos 9% exigidos para o clima Francês. Para determinar qual a melhor estratégia a longo prazo, recorre-se a uma análise do custo do ciclo de vida (*LCCA*). É uma técnica que analisa as despesas locais e manutenção de uma propriedade durante um determinado intervalo de tempo (Passive-On Project, 2007a)

A seguinte tabela resume os resultados obtidos para o período de retorno de cada zona estudada, apresentando uma base de comparação entre os dois métodos de construção, numa análise a longo prazo.

Quadro 2.2 – Custo do ciclo de vida e período de retorno (Passive-On Project, 2007c)

País		França	Alemanha	Itália	Espanha (Granada)	Espanha (Sevilha)	Reino Unido
Custo Extra Inicial [€/m ²]		103	94	60	24.1	20.5	73
Custo Extra Inicial [%]		9	6.71	5	3.35	2.85	5.54
Poupança Energética Total [kWh/(m ² .ano)]		55	75	86	65.5	37.6	39.7
Poupança Energética Total [%]		45	50	65.4	57.3	40.7	26.4
Custo Extra por poupança [kWh/(m ² .ano)]		1.87	1.25	0.7	0.37	98.385	1.84
LCC 10 anos [€]	Típica	143.731	184.716	193.817	101.828	98.385	108.337
	Passiva	152.621	190.104	190.437	95.976	96.100	111.988
LCC 20 anos [€]	Típica	160.343	204.942	221.148	117.928	108.689	117.875
	Passiva	160.552	200.579	198.458	103.647	102.29	117.256
Período de Retorno do Capital [anos]		19.5	19	8	4	5	19

Analisando o quadro é evidente que as poupanças de energias numa casa passiva comparativamente a uma casa típica com a mesma área de pavimento, estão na ordem dos 25 a 65%. O período de retorno varia entre os 4 a 19 anos, concluindo-se que quanto mais para o sul da Europa se encontra a casa, menor será o período de retorno, isto também se deve em parte ao custo extra inicial ser menor nestes climas.

2.3 Desenvolvimento em Portugal

Em Portugal, o conceito de casa passiva, ainda se encontra em desenvolvimento, existindo poucos casos de estudo para o clima Português. No entanto, sempre foram tomadas medidas em prol de uma temperatura ambiente interior agradável, embora estas medidas não bastem para se classificar uma casa como passiva, demonstram que sempre existiu uma preocupação na construção pela comodidade térmica, sem o uso excessivo de sistemas de aquecimento e arrefecimento para chegar a este conforto.

Os estudos mais recentes desenvolvidos em Portugal mostram que é possível construir edifícios certificados de baixo consumo energético sem adotar medidas tão exigentes como menciona a norma “Passivhaus”. Isto deve-se em parte ao clima que se vive a sul da Europa. Uma das medidas adotadas em zonas com este tipo de clima, passa por conquistar, através da otimização de ventilação natural, um clima agradável no interior da casa que ajudará a estabelecer uma sensação de bem-estar para os ocupantes (Passive-On Project, 2007a).

Em 2007, através de um estudo efetuado pelo “*Passive-On Project*” foi possível ter um caso de estudo que toma em consideração o clima local (Lisboa), normas de construção e o contexto técnico e económico. Este estudo possibilitou ter uma base de comparação entre custo energéticos de uma solução passiva e uma tradicional. A seguinte imagem compara os gastos de aquecimento e arrefecimento entre uma casa típica e uma passiva (Passive-On Project, 2007a).

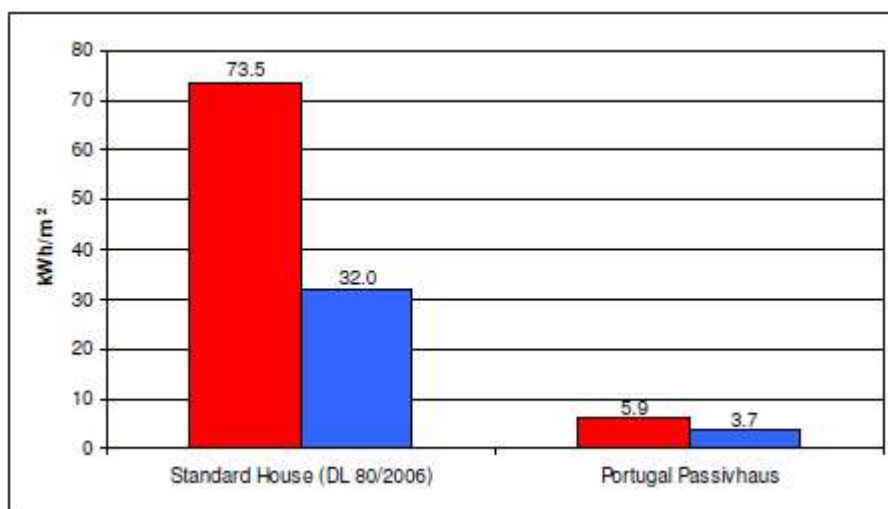


Figura 2.3 – Comparação dos gastos com aquecimento (vermelho) e arrefecimento (azul) de uma casa típica e de uma passiva (Passive-On Project, 2007a)

Outro estudo realizado em Portugal na Universidade de Aveiro defende que a construção de uma casa passiva deverá ter métodos construtivos que se adaptem ao clima onde esta se insere.

A Figura 2.4 resume as necessidades energéticas de uma casa passiva otimizada para os diferentes climas, em 6 regiões portuguesas (Figueiredo *et al.*, 2016).

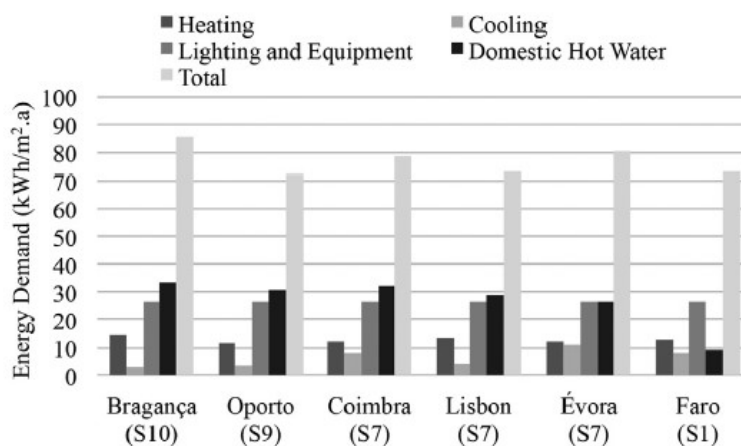


Figura 2.4 – Energia consumida por região (Figueiredo *et al.*, 2016)

Concluem que para climas quentes como o verificado em Portugal o maior entrave ao uso de métodos passivos está relacionado com o excesso de calor verificado épocas altas. Embora os gastos energéticos sejam similares nas diferentes regiões, deve-se ter em conta que as medidas tomadas nas casas passivas estudadas com climas mais adversos, como Bragança, obrigam a um maior investimento inicial, o que irá aumentar o período de retorno deste investimento.

Em maio de 2011 surge a construção da primeira moradia passiva em território nacional, mais concretamente em Ílhavo, Aveiro. Este foi o primeiro passo para a implementação do conceito em Portugal, sendo certificada pela *Passive house Institution* e pela *Homegrid*. Apesar de ser um modelo piloto de um novo conceito construtivo introduzido em Portugal, este obteve classificação energética A+. A seguinte imagem mostra o aspeto exterior final deste projeto (Cardoso e Ascenso, 2011).



Figura 2.5 - *Passivhaus* de Ílhavo (Passivhaus@, 2015)

3 COBERTURAS VERDES

3.1 Introdução

O forte crescimento populacional motiva o aumento de edifícios e infraestruturas, que conduz a um crescimento de áreas impermeáveis em zonas urbanas, que por sua vez irá alterar o equilíbrio de todo o planeta, provocando o aumento do aquecimento global, erosão do solo, diminuição da qualidade do ar, aparecimento de ilhas de calor, entre outros (Silva *et al.*, 2016).

Um dos fatores ambientais mais preocupantes no setor da construção, dá-se nas zonas mais desenvolvidas devido ao excesso de zonas edificadas sem se ter em conta o crescente défice de zonas verdes. A este fenómeno dá-se o nome de “*Ilha de Calor*” urbano e provoca um aumento da temperatura local, que conseqüentemente levará a um aumento do uso de métodos de refrigeração.

Estas alterações ambientais podem ser reduzidas através da criação de métodos que permitam um desenvolvimento mais ecológico, mas para tal ser possível é necessário diminuir o uso de energias fósseis. Este tema revê-se no conceito de casa passiva anteriormente abordado, e neste seguimento têm sido desenvolvidos vários estudos de medidas que possam alterar o paradigma que se vive atualmente nas grandes cidades, que sejam economicamente viáveis e benéficos para o ecossistema.

As coberturas verdes distinguem-se por ser um novo método construtivo que pode contribuir para uma melhor gestão do consumo energético tão desejado na construção de edifícios. Para além da redução do consumo energético, a utilização deste sistema conta com inúmeras vantagens para o edifício e a envolvente do mesmo. De destacar a ajuda que fornece à gestão de águas pluviais, o aumento da durabilidade da cobertura, melhor isolamento acústico, a redução da necessidade energética de aquecimento e arrefecimento através de sistemas de ar condicionado devido à melhoria do isolamento, conduzindo por sua vez a um melhor equilíbrio da temperatura ambiente interior, e por fim, permite repor os índices de espaços verdes que estão em falta nas grandes cidades, diminuindo o efeito de “*Ilha de Calor*” e aumentando a biodiversidade em falta nestes locais (Bevilacqua *et al.*, 2016).

3.2 Revisão Histórica

O primeiro caso registado remonta ao século VI a.C. na Babilónia, os Jardins Suspensos (Ascione *et al.*, 2013). Desde então, este método construtivo tem vindo a ser adaptado e desenvolvido de modo a mitigar os problemas ambientais que se têm vindo a agravar devido à contínua má gestão por parte do Homem.

Em 1956 surgiu em Portugal o primeiro edifício nacional a utilizar o referido método construtivo. A construção dos jardins da Fundação Calouste Gulbenkian, contou com o apoio dos Arquitetos Paisagistas Gonçalo Ribeiro Telles e António Viana Barreto. Atualmente este edifício é uma referência nacional e um meio de desenvolvimento de estudos experimentais nesta matéria.

Existem vários estudos numéricos e experimentais já realizados que servem de apoio à tomada de decisão do género de cobertura verde que melhor se adapta ao clima de determinado país. No entanto é uma matéria ainda em constante desenvolvimento onde se procuram novas maneiras de alcançar melhores benefícios, por exemplo, uma melhor eficiência térmica, e melhor gestão de águas pluviais.

3.3 Características de uma cobertura verde padrão

As coberturas verdes dividem-se em duas categorias: extensivas e intensivas (Tassi *et al.*, 2014). As extensivas são coberturas leves, de reduzida espessura (6 a 25 cm) que requerem pouca manutenção, logo as plantas utilizadas devem ser capazes de se adaptar e resistir a diferentes condições climáticas a que estarão sujeitas. As coberturas intensivas apresentam uma camada de solo mais considerável (25 a 70 cm) originando uma maior carga atuante em todo o edifício, logo deve ser tida em conta na conceção projeto da estrutura (Silva, 2014). Este método irá requerer mais manutenção e por vezes sistemas de rega automático, no entanto permitem a utilização de plantas de grande porte, podendo destinar-se a uso para fins desportivos, de lazer, entre outros, ou seja, caracterizam-se principalmente por serem acessíveis (Tassi *et al.*, 2014).

As coberturas verdes têm a capacidade de reduzir a necessidade energética de sistemas aquecimento e arrefecimento, pois devido à sua capacidade de absorção da radiação solar e ao fenómeno de evapotranspiração por parte da vegetação será obtido uma redução do fluxo de calor entre a cobertura e o interior do edifício, conseguindo-se temperaturas mais frescas durante o Verão. Durante o Inverno a cobertura verde oferece uma camada de isolamento mais compacta reduzindo as perdas de calor do interior do edifício para o espaço exterior.

As características deste novo método construtivo dependem da zona em que se encontram, podendo variar: o número de camadas que o compõem; a espessura; os materiais utilizados; o tipo de vegetação e o fim a que se destina. Usualmente é constituído no mínimo pelas 6 camadas representadas na seguinte figura (Tassi *et al.*, 2014):

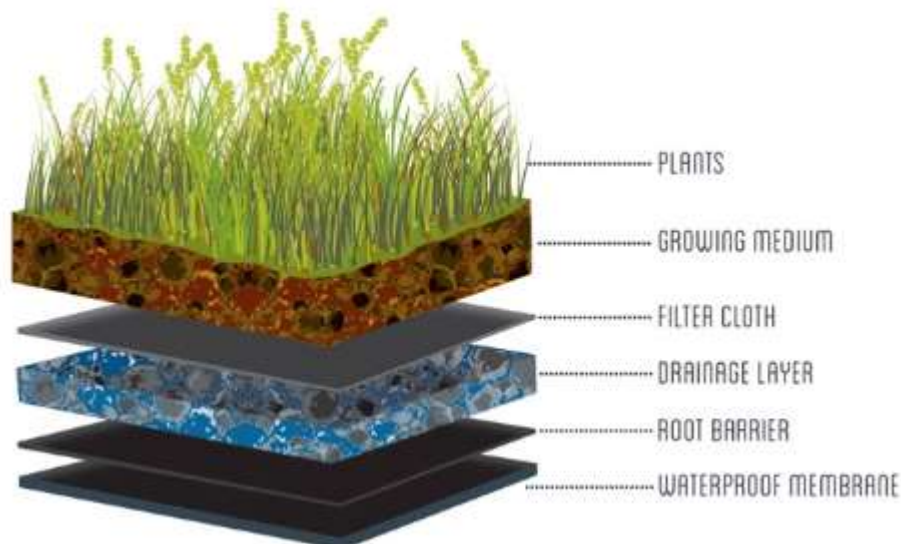


Figura 3.1 – Camadas típicas de uma cobertura verde (Restora@, 2016)

- A camada superior é designada por camada de vegetação (*plants*), esta deve-se adequar às condições climáticas locais. É responsável por: retardar o escoamento superficial de águas pluviais, quando o substrato atingir o ponto de saturação, pelo processo de evapotranspiração permitindo manter a cobertura fresca mesmo com temperaturas exteriores elevadas; adicionalmente suporta biodiversidade;
- A segunda camada é conhecida como substrato (*Growing médium*), designa-se por ser a camada de solo que serve de fixação à camada de vegetação, fornecendo água e os nutrientes necessários para a sua manutenção. Durante os eventos chuvosos ajuda a reter a água, retardando assim o seu escoamento;
- A camada seguinte é constituída por um material filtrante, geotêxtil, que separa a camada de substrato da camada de drenagem (*filter cloth*);
- A camada de drenagem (*drainage layer*) é utilizada em telhados com pouca inclinação e previne o aparecimento de alagamentos. Para além disso esta camada é responsável por acumular a água da chuva necessária para a vegetação durante períodos menos húmidos;

- De seguida existe a camada protetora (*root barrier*), esta impede que o crescimento das raízes da vegetação entre em contacto com a camada de impermeabilização;
- Por fim tem-se o revestimento de impermeabilização (*waterproof membrane*) servindo como último recurso de modo a impedir o contacto da água com o material estrutural que constitui o telhado do edifício, protegendo os edifícios de possíveis infiltrações.

3.4 Benefícios comparativamente a coberturas tradicionais

O crescente aumento populacional tem originado um acréscimo de indústrias, construções e transportes o que leva a um aumento descontrolado de emissões poluentes para a atmosfera e muito acima dos limites do planeta. Uma das maneiras de reduzir as emissões é aumentar as zonas verdes, uma solução passa por aumentar as coberturas verdes, que são capazes de absorver estes poluentes, diminuindo assim a poluição atmosférica.

Uma outra vantagem deste tipo de cobertura está associado ao retardamento e diminuição do escoamento de pico de águas pluviais. Com o aumento de área verde e da camada do solo capaz de reter a água da chuva dá-se um melhoramento na gestão de águas pluviais que não é possível nos telhados tradicionais (Berndtsson, 2010). A Figura 3.2 ilustra a diferença entre os dois tipos de telhados mencionados quando submetidos à mesma condição de precipitação. Sendo de notar que a cobertura verde terá um pico de intensidade de chuva mais reduzido e mais tarde do que uma cobertura tradicional que não oferece capacidade de permeabilização das águas pluviais, e como tal pode-se considerar que o comportamento desta apenas dependerá do evento chuvoso em análise.

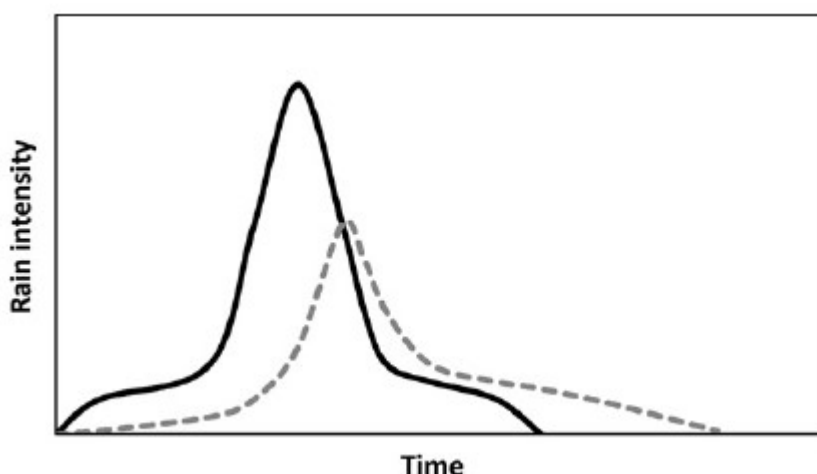


Figura 3.2 – Comportamento de uma cobertura verde (linha a tracejado) e de uma cobertura tradicional (linha contínua) de um dado evento chuvoso (Berndtsson, 2010)

De entre todas as suas vantagens destaca-se ainda a nível ambiental a capacidade de redução do fenómeno “*Ilha de Calor*” que tem vindo a aumentar devido à maior presença de edifícios e de zonas pavimentadas nas zonas urbanas, provocando um aumento de temperaturas nas zonas mais edificadas. Este aumento de temperatura irá conseqüentemente provocar um maior consumo de energia por parte dos equipamentos de ar condicionado que por sua vez contribuem para o aumento da poluição ambiental. Como tal de modo a quebrar esta cadeia de eventos, uma das soluções passa pela criação dos espaços verdes em falta nestas zonas. Com a aplicação das coberturas verdes será possível intercetar parte da radiação solar através da vegetação aí existente diminuindo as temperaturas interiores e ao mesmo tempo aumentando a qualidade do ar (Retzlaff *et al.*, 2011).

A Figura 3.3 mostra um exemplo da variação de temperatura num clima quente entre as zonas mais edificadas e as ainda em desenvolvimento. De referir que em climas frios as ilhas de calor podem ser consideradas em parte benéficas, pois com o aumento da temperatura consegue-se diminuir a necessidade de sistemas de aquecimento, no entanto em climas quentes, como o verificado nas zonas mediterrânicas, este fenómeno é prejudicial em todos os sentidos, sendo os picos de temperatura verificados nas zonas mais edificada preocupantes.

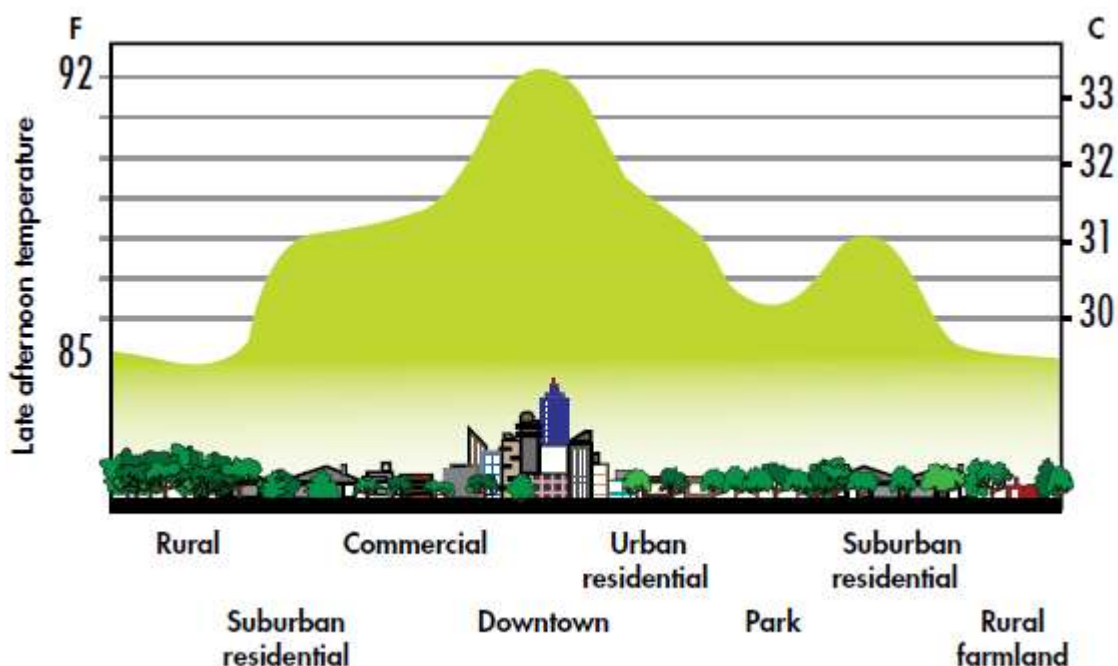


Figura 3.3 – Variação da temperatura causada pelo fenómeno *Ilha de Calor* (Retzlaff *et al.*, 2011)

Um estudo recente efetuado pela Universidade de Toronto (Berardi, 2016) apresenta o benefício deste tipo de coberturas e o impacto que terá nestes microclimas. Este artigo defende que a

adoção deste método reduzirá a temperatura ambiente nas zonas urbanas, estando esta redução associada ao índice de *Leaf Area Index (LAI)* este parâmetro está associando às características da vegetação implementada e refere-se à área de vegetação presente na cobertura. Esta redução da temperatura ambiente será mais elevada quanto maior for o parâmetro *LAI*, isto deve-se ao aumento da capacidade de evapotranspiração por parte da vegetação da cobertura, que influenciará diretamente o ambiente envolvente. Em termos energéticos conclui-se que o aumento de área verde da vegetação terá um impacto menor na poupança energética quando comparado com a influencia do aumento da camada do solo. Esta será a camada principal responsável por fornecer uma camada de isolamento capaz de reduzir as transferências de calor do exterior para o interior do edifício e vice-versa (Berardi, 2016).

No entanto as coberturas verdes possuem um custo de instalação e manutenção superior a um telhado tradicional, sendo que estes custos terão retorno a nível financeiro devido à maior durabilidade da cobertura verde e aos benefícios energéticos que este tipo de solução proporciona. É difícil apreciar um custo fixo viável que sirva de meta de comparação entre os dois métodos, pois as características destas coberturas devem ser adaptadas ao clima em que se insere, sendo ainda influenciado pela tipologia do edifício, e do propósito a que este se destina.

3.5 Eficiência energética

Este é um tópico muito debatido que gera alguma discordância entre os estudos até hoje efetuados, pois trata-se de um tema em constante desenvolvimento em que a capacidade para reduzir gastos energéticos depende de vários fatores. No entanto é notório que todos os autores consideram este processo benéfico para o ambiente, proporcionando vários ganhos a níveis energéticos e de qualidade de vida.

3.5.1 Importância das camadas de vegetação e substrato em diferentes climas

Um grupo de investigadores através do uso de um programa numérico de análise da eficiência energética para coberturas verdes, *EnergyPlus* (Energy@, 2016), estudou os ganhos energéticos que esta solução apresenta num edifício destinado a escritórios, submetido a diferentes climas Europeus (Ascione *et al.*, 2013). Concluíram que em espaços quentes este método é uma boa solução, capaz de reduzir a temperatura ambiente devido a efeitos como evapotranspiração e absorção da radiação solar pela vegetação, permitindo que a cobertura fique mais fresca, e em climas frios destacam a sua utilidade para reduzir as perdas térmicas, através da camada de substrato, permitindo reduzir custos de energias para aquecimento.

3.5.2 Desempenho do isolamento térmico em diferentes coberturas verdes

Outro estudo (Bevilacqua *et al*, 2016), analisa o comportamento térmico de 4 coberturas, 3 delas extensivas com diferentes camadas e uma tradicional pintada de preto, em clima mediterrânico. Chegaram à conclusão que se abdicasse do uso da membrana de isolamento térmico nas coberturas extensivas ter-se-ia uma temperatura na camada inferior da cobertura verde, ou seja, a que liga a cobertura ao resto da estrutura, inferior em média 12 °C comparativamente à solução tradicional. A presença da camada de isolamento térmico revelou-se menos eficaz quando submetido a climas quentes, tendo-se obtido na mesma camada uma temperatura 4°C inferior ao do telhado tradicional. No entanto este isolamento terá um desempenho fulcral no inverno, permitindo um ganho energético nessa mesma camada na ordem dos 4 °C. Em termos de ganhos interiores, no verão verifica-se uma diminuição da temperatura interior na ordem dos 2.3 °C, no inverno apesar dos ganhos não serem tão expressivos garante-se que no mínimo as temperaturas obtidas são similares às conseguidas através da solução convencional.

3.5.3 Diferenças entre um solo com e sem sistema de irrigação no verão e importância da área de vegetação

Sailor (2008) desenvolveu um modelo numérico que permite estudar os efeitos de uma cobertura verde e a eficiência energética da mesma sem recorrer a ensaios experimentais. Este estudou a importância da camada de solo com diferentes índices de humidade, para diferentes locais e concluiu que aumentando a irrigação durante o verão é benéfico quanto mais quente e seco for o ambiente local.

Por outro lado, aumentando a densidade da vegetação (*LAI*) reduz-se os consumos energéticos durante o verão, mas aumenta o aquecimento necessário no inverno. Isto deve-se à camada de vegetação bloquear a penetração de raios solares diminuindo assim a temperatura da cobertura, sendo benéfico em períodos quentes, mas prejudicial nos períodos mais frios (Sailor, 2008).

Um outro estudo desenvolvido na Universidade de Lisboa (Silva, 2014), baseado no modelo desenvolvido por Sailor (2008) conclui que no verão será sempre benéfico ter um sistema de irrigação desde que se trate de um clima quente, como na maior parte dos países a sul da Europa. Isto deve-se à irrigação aumentar os efeitos de arrefecimento por transpiração das plantas e por evaporação da água do solo. No inverno, diminuindo os índices de irrigação conseguem-se melhores resultados, pois diminui-se a condutibilidade da camada de solo, aumentando a capacidade de evitar trocas de energia com o exterior.

3.5.4 Importância da camada de drenagem

Um ensaio recente realizado em Espanha (Coma *et al.*, 2016), apresenta 3 diferentes soluções experimentais sujeitas ao mesmo clima onde apenas a cobertura é alterada. Das 3 soluções, uma é modelada como uma cobertura convencional com isolamento térmico, e as outras duas são coberturas extensivas em que se abdica do uso da camada de isolamento e onde apenas é alterado as propriedades da camada de drenagem. Este estudo permite avaliar a importância da camada de drenagem na procura por uma redução de níveis de consumos energéticos de sistemas de aquecimento e arrefecimento. É de notar ainda as fases de crescimento e decaimento da vegetação nas diferentes estações do ano, pois influenciam o comportamento da cobertura verde e no entanto não é uma possibilidade considerada através da simulação numérica.

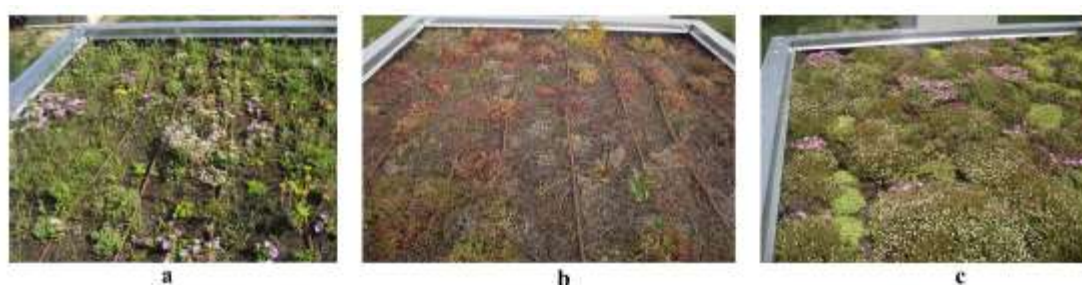


Figura 3.4 – Fases de crescimento de uma cobertura extensiva: “a” durante o primeiro verão (2011), “b” período de Inverno (2011-2012) e “c” Verão de 2012 (Coma *et al.*, 2016)

Durante o verão ambas as soluções apresentam valores de consumos energéticos inferiores aos da cobertura tradicional. No entanto para períodos em que será necessário aquecimento, as duas soluções apresentam valores de necessidade energética superior ao da cobertura de referência. Estes resultados foram obtidos para um clima quente e seco como verificado em grande parte dos países a sul da europa e permitem o estudo da influência da camada de drenagem numa cobertura verde, pois apesar de esta camada ser irrelevante do ponto de vista da eficiência energética, terá um grande impacto no comportamento das camadas de vegetação e substrato devido à sua capacidade para reter água, alterando assim a humidade do solo e a condutividade do mesmo (Coma *et al.*, 2016).

3.5.5 Poupanças energéticas

Em 2016, em Portugal, foi desenvolvido um estudo comparativo de diferentes tipos de coberturas verdes submetidas às mesmas condições climáticas, através de uma análise numérica e experimental (Silva *et al.*, 2016). Esta investigação compara três soluções: extensiva, intensiva e uma semi-intensiva, esta última distingue-se das outras duas por se tratar de uma camada com características intermédias. Encontrar um equilíbrio do tipo de solução a adotar para cada clima torna-se então fulcral na busca por um melhor aproveitamento dos recursos utilizados. A Figura 3.5, apresenta as diferenças em necessidade energética quando apenas a camada de vegetação e de substrato do solo são alteradas.

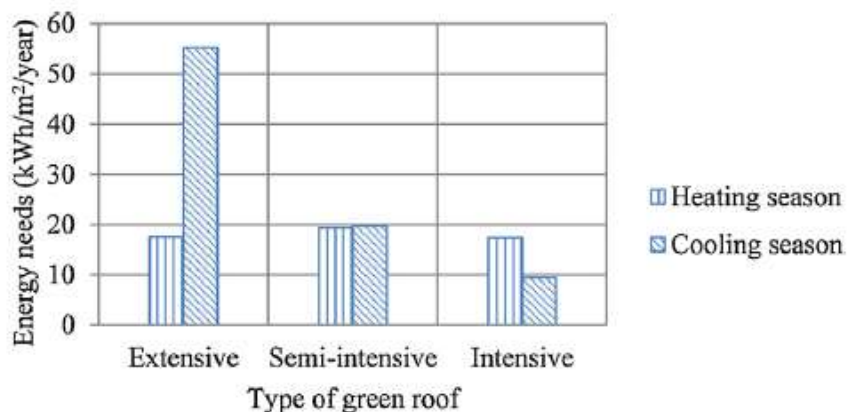


Figura 3.5 – Energia necessária para aquecimento e arrefecimento (Silva *et al.*, 2016)

A Figura 3.6 compara as três soluções iniciais com duas soluções tradicionais, uma cobertura branca e outra preta, para diferentes níveis de isolamento térmico (XPS). De um modo geral pode-se concluir que as soluções intensivas são as que garantem mais ganhos energéticos ao longo de todo o ano, e com o aumento dos níveis de isolamento térmico existe uma redução da energia necessária, no entanto em climas frios, altos níveis de isolamento não apresentam resultados tão satisfatórios, pois revelam uma taxa de eficácia muito reduzida (Silva *et al.*, 2016).

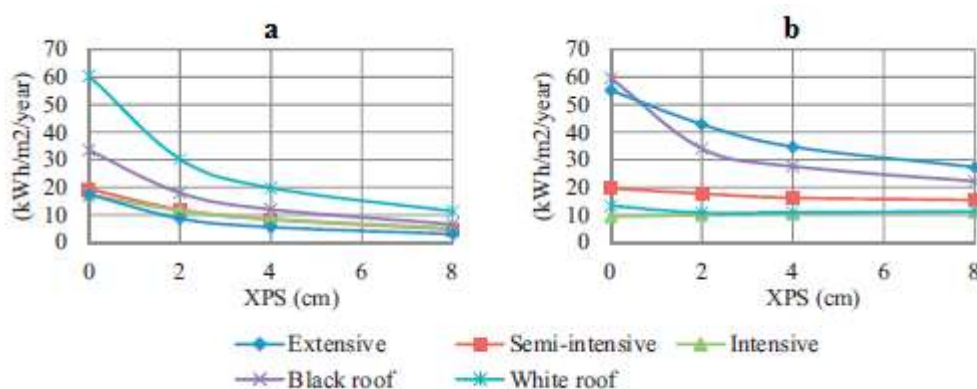


Figura 3.6 – Energia necessária de aquecimento “a” e arrefecimento “b” para diferentes coberturas (Silva *et al.*, 2016)

Registaram-se ganhos energéticos anuais em relação à cobertura preta na ordem dos 30-60% para a cobertura intermédia e 45-70% para a cobertura intensiva, dependendo do nível de isolamento. Em relação à cobertura branca os ganhos energéticos não são tão evidentes, no entanto registam-se poupanças na ordem dos 10-45% e 25-60%, respetivamente para a cobertura intermédia e a intensiva. A cobertura extensiva por sua vez será uma boa opção para edifícios que tenham limitações a nível estrutural de capacidade de carga, como acontece geralmente nas reabilitações de edifícios. Em termos ganhos energéticos anuais apresenta em

relação à cobertura pintada de preto uma poupança de 20%, no entanto em relação ao pintado de branco denota-se que tem um comportamento similar ao mesmo numa análise anual.

Ainda de ter em conta que as poupanças energéticas neste caso são significativamente maiores, quando comparado com as alcançadas noutros trabalhos, pois neste estudo todas as trocas de calor são feitas pela cobertura, devido ao estúdio considerado ter grandes índices de isolamento nas fachadas não permitindo trocas de calor por estes elementos.

3.6 Contribuição para uma solução passiva

É notório que os benefícios ambientais e energéticos só por si já justificam a utilização deste tipo de cobertura, no entanto é preciso comparar esta solução com outro tipo de coberturas de modo a perceber qual será a solução ideal, ou seja, a solução passiva mais rentável em termos de eficiência energética. Esta comparação será efetuada com mais detalhe no caso de estudo, onde se estuda a eficiência energética da cobertura existente (tradicional), e a adoção de vários tipos de coberturas verdes.

A cobertura, em conjunto com as fachadas, são os maiores responsáveis pela transmissão de calor devido aos altos níveis de exposição e emissão solar, é neste contexto crucial otimizar estes elementos de modo a reduzir os ganhos energéticos existentes nestas épocas para que se possa considerar uma solução passiva. Deste modo será possível obter temperaturas no interior do edifício, dentro do intervalo conforto, sem que seja necessário o uso de sistemas de arrefecimento.

Uma vez que a cobertura na maior parte das moradias é o elemento que apresenta uma maior área de exposição, será também aquele que mais contribui para reduzir as trocas de calor com o exterior. No caso das coberturas verdes, as poupanças energéticas estão associadas à correta escolha de fatores como: tipo de vegetação, área da vegetação, espessura da camada do substrato, tipo de sistema de rega, e se tem ou não camada de isolamento adicional.

De referir ainda que a importância da cobertura e os efeitos dos ganhos energéticos desta num edifício de baixo consumo energético serão proporcionais ao número de andares do edifício. Por exemplo, os ganhos energéticos conseguidos através da cobertura serão mais relevantes para edifícios com menor número de andares, pois os ganhos energéticos no piso da cobertura vão diminuindo consoante o número de andares abaixo da cobertura, logo a transferência de energia entre pisos através da laje irá reduzir o impacto da cobertura verde quando se estuda os consumos energéticos da totalidade do edifício.

4 ENQUADRAMENTO DO CASO DE ESTUDO

4.1 Construção modular em *Light Steel Framing (LSF)*

Antes de apresentar o modelo em estudo é necessário perceber o conceito estrutural por detrás do mesmo. Trata-se de uma estrutura leve em aço, mais conhecida por *LSF*, em que os elementos estruturais, tal como o nome indica, são constituídos por aço, mais especificamente aço galvanizado enformado a frio.

A construção modular é referente ao processo construtivo, e baseia-se na pré-fabricação por módulos, de todos os elementos estruturais. Por sua vez a montagem destes blocos pode ser feita na integra em fábrica, faltando apenas o transporte e aplicação em obra. Para construções de maior envergadura que impossibilitem o transporte para a obra de uma só vez, pode-se usar painéis que posteriormente são transportadas e montadas em obra.

Este tipo de construção revê-se no conceito casa passiva, destacando-se: a sua rapidez de execução em obra; sustentabilidade construtiva, pois o desperdício de material será menor; melhor desempenho térmico e acústico, dependendo do tipo de materiais e técnicas construtivas utilizadas; melhor controlo de qualidade e durabilidade, permitindo obter ganhos energéticos mais elevados, uma vez que são eliminados os erros construtivos em obra.

Ainda de destacar a versatilidade que este tipo de construção permite, possibilitando que o local de habitação se adapte às consequências de uma vida sem que seja preciso mudar de casa.

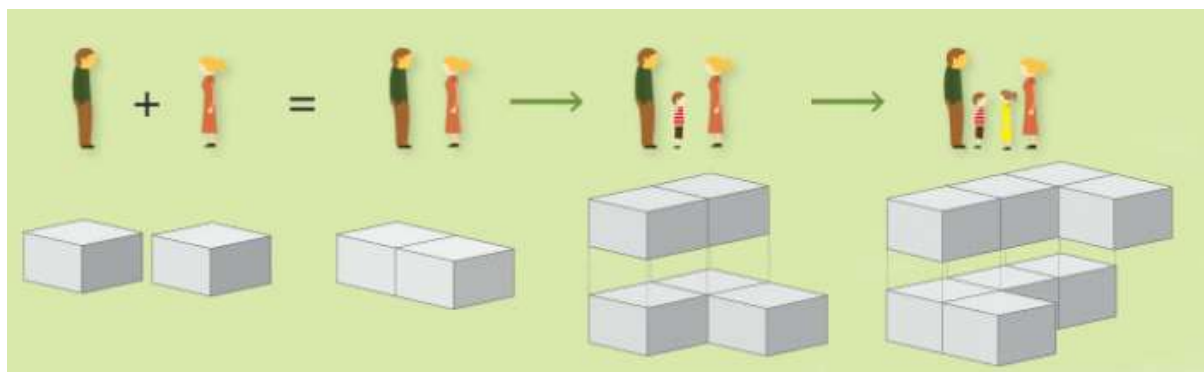


Figura 4.1 – Capacidade de adaptação da construção modular (coolhaven@, 2016)

4.2 Modelo inicial

A moradia que serve de base para o estudo, construída no concelho de Coimbra, designa-se por *CoolHaven*, é assente nos princípios de construção modular através de *LSF*, e é considerada uma solução com elevada eficiência energética. A seguinte figura apresenta o aspeto exterior da moradia.



Figura 4.2 – Moradia *CoolHaven*

O modelo numérico desenvolvido através do programa *DesignBuilder* simula na totalidade as características da moradia de modo a permitir uma análise rigorosa. De seguida (Figura 4.3) apresenta-se o modelo inicial desenvolvido por (Gervásio *et al*, 2014), e as respetivas plantas (ver Figura 4.4 e 4.5).

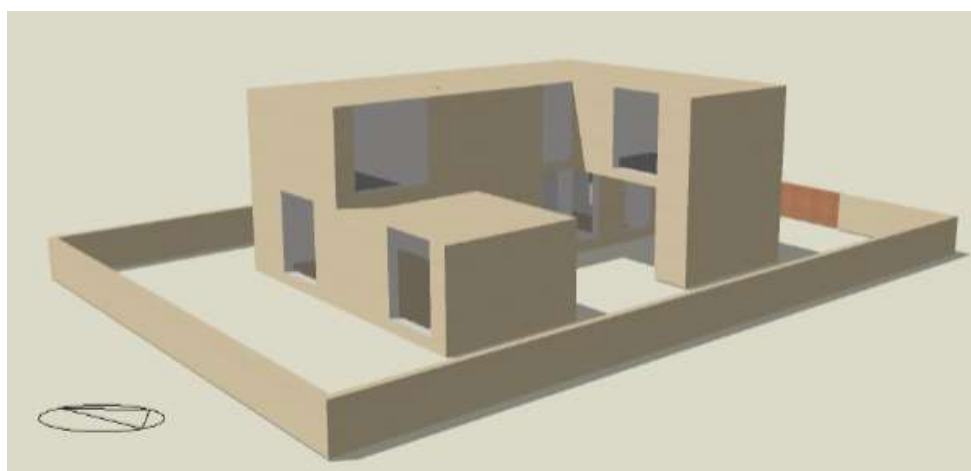


Figura 4.3 – Modelo computacional representativo da moradia *CoolHaven*

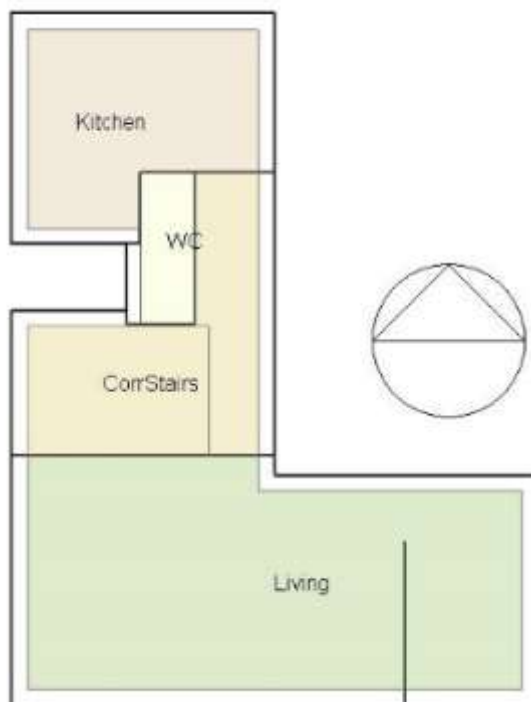


Figura 4.4—Planta piso 0 da moradia *CoolHavem* (modelo)

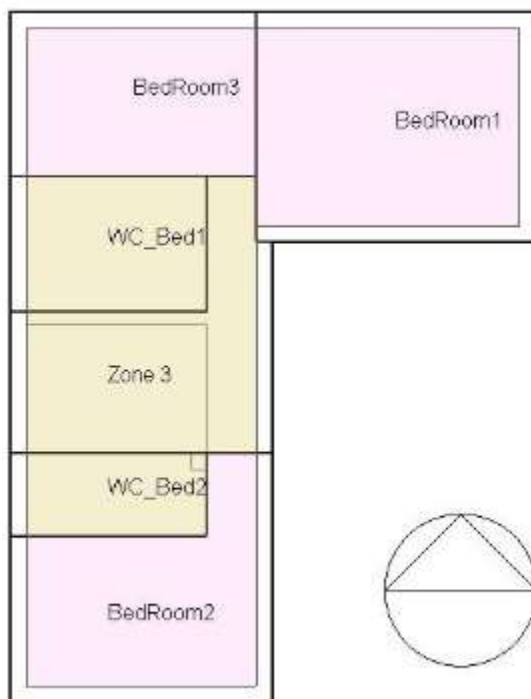


Figura 4.5—Planta piso 1 da moradia *CoolHavem* (modelo)

São ainda apresentados os pormenores construtivos das fachadas e da cobertura, uma vez que serão os elementos mais relevantes para o estudo da eficiência energética levado a cabo no capítulo seguinte. A pormenorização da fachada, apesar de não ser estudado o seu efeito, é preciso ter em conta para se perceber o comportamento térmico global do caso de estudo, pois as condições de isolamento das fachadas irão afetar o desempenho da capacidade da cobertura verde.

O pormenor apresentado na Figura 4.6 diz respeito à cobertura considerada no modelo, que posteriormente será adaptada para a colocação da cobertura verde. De ter em conta que a cobertura do piso 0, diz respeito a uma varanda acessível com as mesmas propriedades que a cobertura do piso 1 e será mantida como tal.

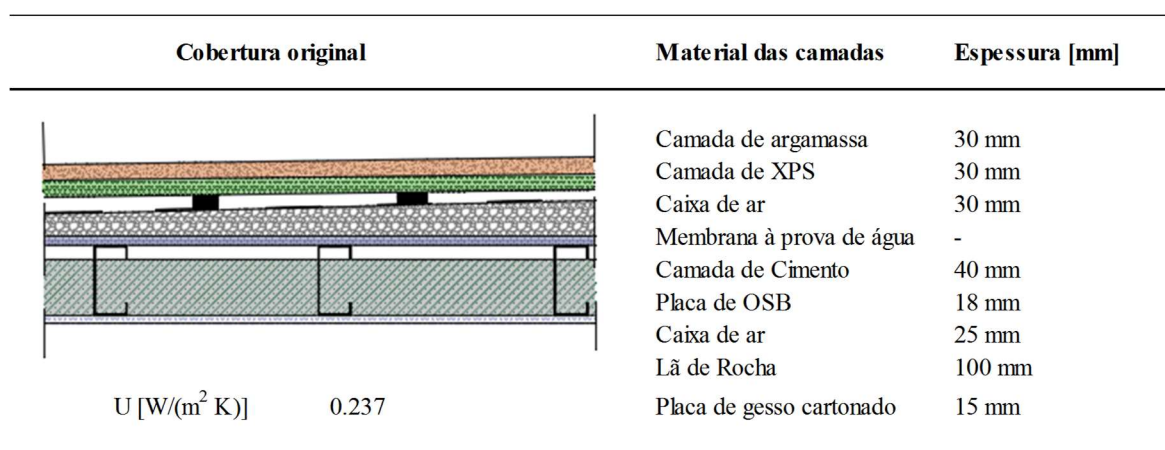


Figura 4.6 – Pormenor construtivo e propriedades da cobertura do piso 1

As fachadas por sua vez serão mantidas e apresentam as seguintes propriedades.

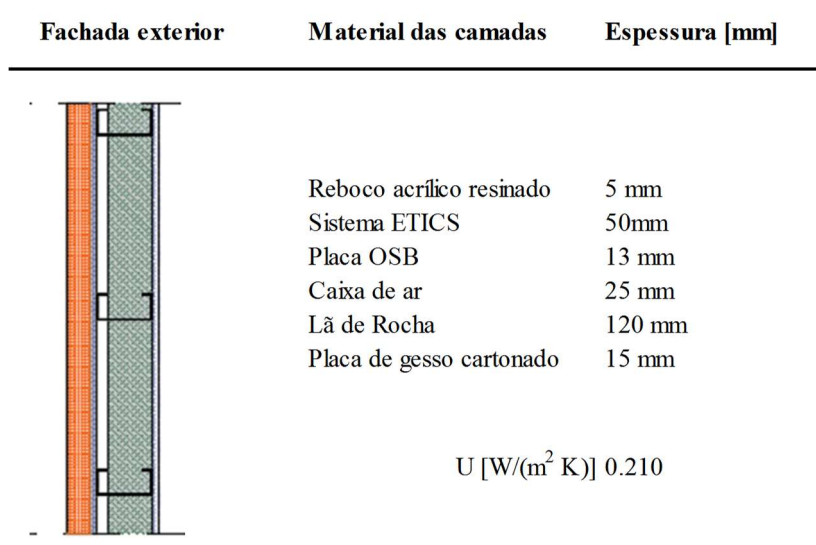


Figura 4.7 – Pormenor construtivo e propriedades da fachada exterior

Para uma informação mais detalhada sobre o modelo pode-se consultar o artigo já referido, onde é apresentado o modelo na íntegra e todos os aspetos construtivos considerados.

4.3 Condições climáticas

Um dos métodos mais usados para a classificação climática consiste no mapa climático desenvolvido por Wladimir Köppen com a colaboração de Rudolf Geiger. A classificação é dividida por grupos, sendo que: a primeira letra corresponde à característica geral do clima da região e divide-se de “A” a “E”; a segunda letra corresponde ao tipo de clima dentro do grupo, diferenciando a quantidade e distribuição da precipitação (no caso da primeira letra ser “A”, “C” ou “D”), para o caso “B” e “E” a segunda letra corresponde à quantidade de precipitação anual e a temperatura média anual, respetivamente; a terceira letra denota a temperatura média mensal dos meses mais quentes.

Em Portugal existem maioritariamente dois tipos de clima: Csa e outro mais a norte Csb, o primeiro é referente a um clima temperado húmido com verão seco e quente, o segundo representa um clima temperado húmido com verão seco e temperado. Separando por letras, a letra “C” faz referência a um clima temperado ou temperado quente, a letra “s” sugere um Inverno chuvoso, a letra “a” corresponde a um Verão quente e seco e a letra “s” refere-se a um Verão temperado. A figura 4.8 mostra a divisão climática da Península Ibérica através de Köppen-Geiger e referenciado pelo AEmet (Agencia Estatal de Meteorologia) e IM (Instituto de Meteorologia).

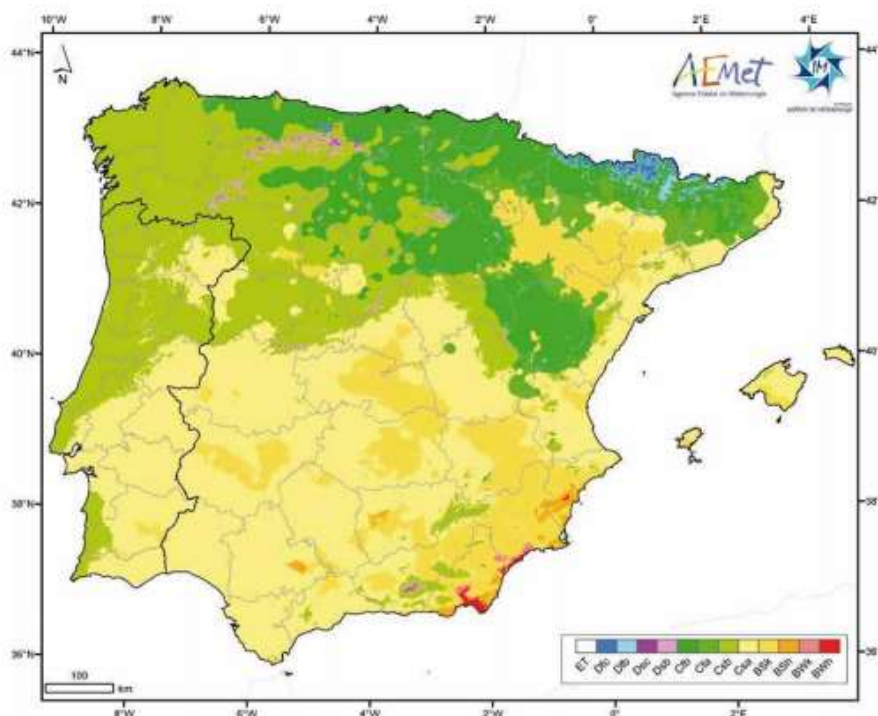


Figura 4.8 – Mapa climático da Península Ibérica segundo Köppen-Geiger (AEmet, 2000)

O programa *EnergyPlus* possui uma base de dados que tem vindo a ser aperfeiçoada ao longo dos anos em conjunto com várias instituições. Para o clima português os dados são recolhidos pela *International Weather for Energy Calculation (IWEC)* e são relativos a uma média a 30 anos do clima registado, sendo que o programa se refere a estes valores como os verificados para o ano 2002. O programa permite ainda efetuar simulações para as semanas típicas e para as semanas de projeto.

Para o clima português o *software* de análise recorre a dados médios para a zona em estudo, como tal, decidiu-se fazer um processo de validação de modo a garantir que a informação dada pelo programa é próxima da realidade ainda nos dias de hoje. Se esta validação não se verificar, tem de se introduzir os dados corretos na base de dados do programa de modo a conseguir estudar a eficiência energética deste modelo para a localização pretendida.

Através dos dados do *software* será possível fazer uma análise mais exata, uma vez para além da temperatura exterior o programa ainda tem em conta a: humidade do ar; velocidade do vento; radiação solar direta e difusa; a temperatura exterior; entre outros que em conjunto permitem estudar todos os processos naturais de uma cobertura verde. A Figura 4.9 apresenta a temperatura anual que o programa leva em consideração para o clima em Coimbra.

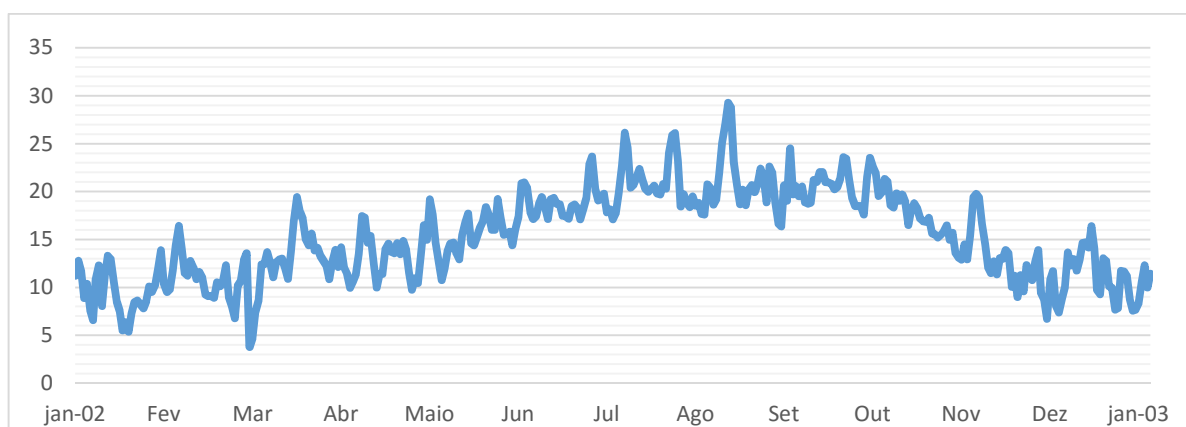


Figura 4.9 – Temperatura média diária (*Software*)

Foi ainda analisada a diferença climática entre a temperatura ambiente exterior oferecida pela base de dados do programa e a verificada para o ano 2015 (Figura 4.10), deste modo, é possível avaliar as mudanças climáticas existentes ao longo dos anos, e saber se a temperatura da base de dados é válida para o período atual.

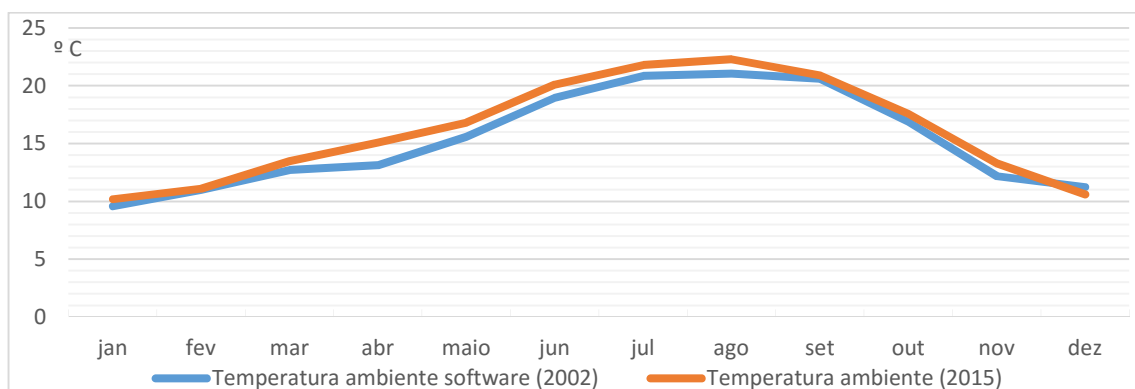


Figura 4.10–Temperatura média mensal (*software*) e 2015 (Clima@, 2016)

Ficam assim validados os dados relativos à temperatura ambiente presentes no software para Coimbra. Como tal, decidiu-se adotar toda a informação dada pelo programa referente a Coimbra. De seguida apresenta-se os valores representativos da temperatura do ar, velocidade do vento e da radiação solar das duas semanas de projeto (Figura 4.11 – 4.14).

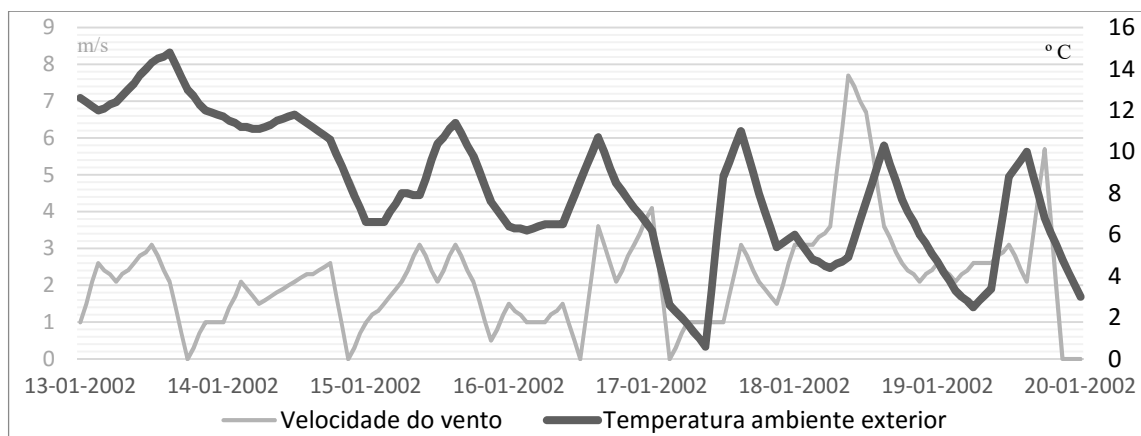


Figura 4.11 – Velocidade do vento e Temperatura exterior: semana de projeto de Inverno

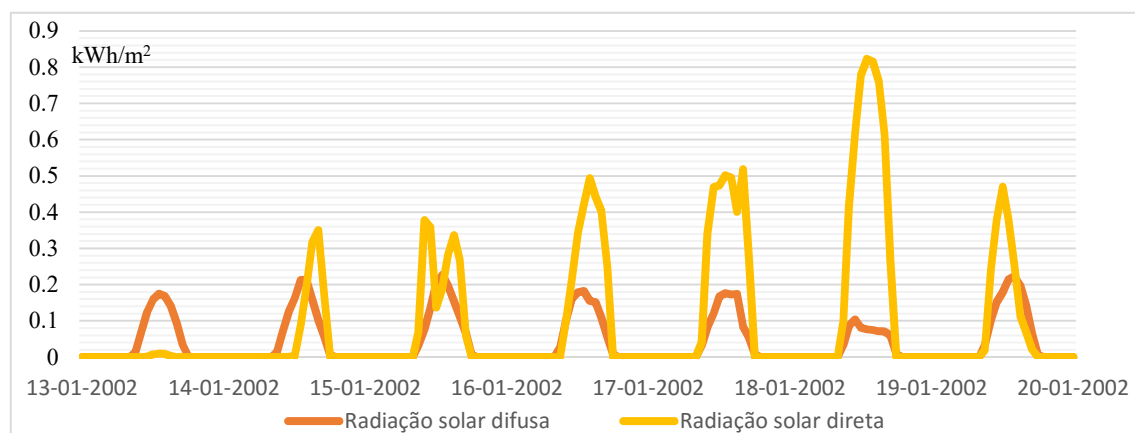


Figura 4.12 –Radiação solar: semana de projeto de Inverno

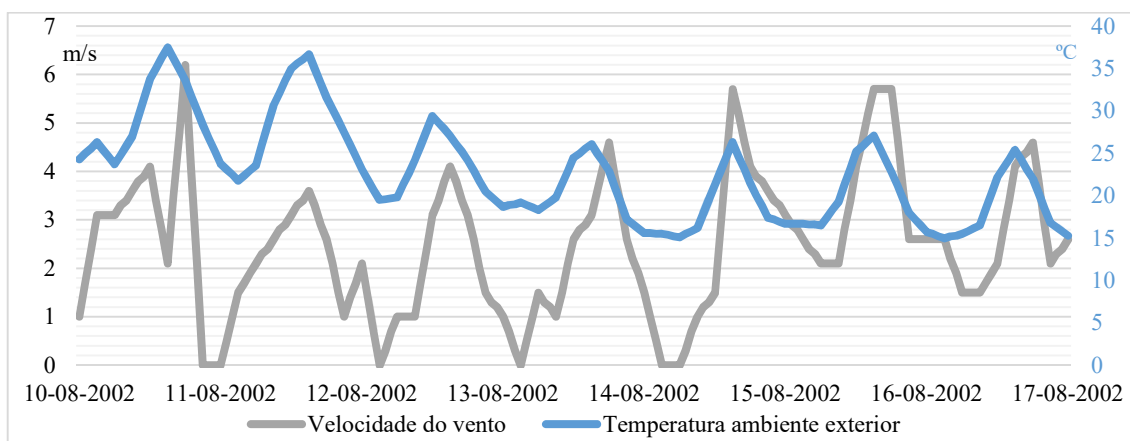


Figura 4.13 – Velocidade do vento e Temperatura exterior: semana de projeto de Verão

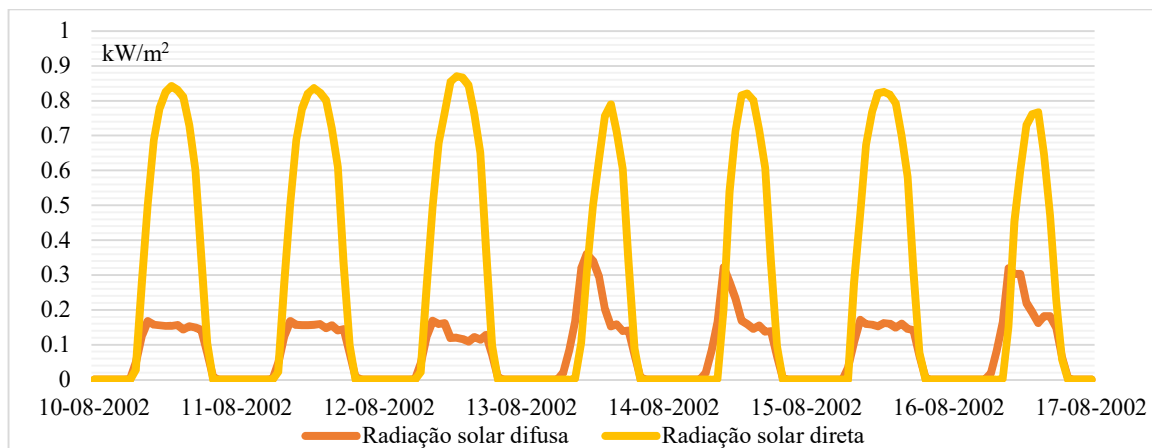


Figura 4.14 –Radiação solar: semana de projeto de Verão

De forma a se perceber melhor as diferenças de temperatura entre semana típica e a de projeto, de seguida (Figura 4.15), apresenta-se uma comparação entre os dois tipos de análise abordados, sendo que ao longo do trabalho será dada mais ênfase às semanas de projeto.

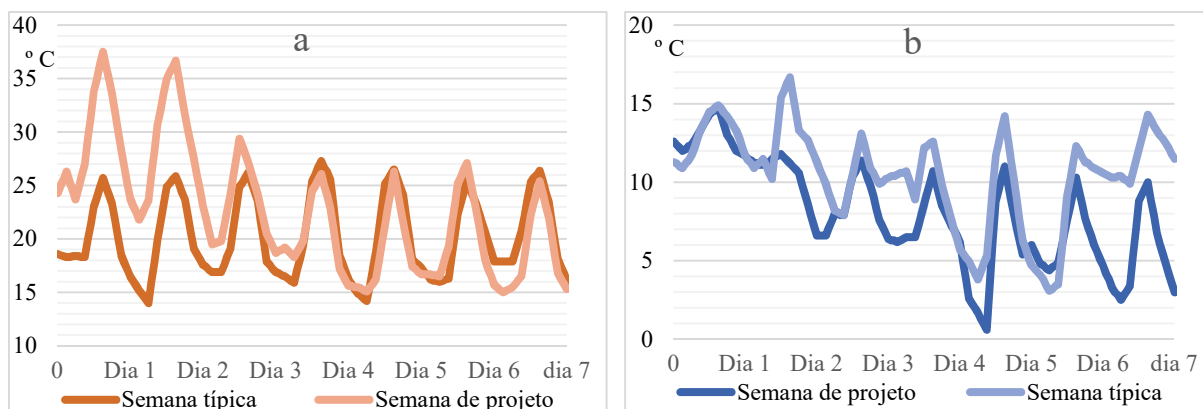


Figura 4.15 – Temperatura exterior Verão “a” e Inverno “b”

4.4 EnergyPlus

Como já referido, para avaliar o balanço energético da cobertura verde é necessário recorrer a um programa de cálculo que leve em consideração o comportamento térmico das camadas de solo e de vegetação. Como tal, recorreu-se ao *software EnergyPlus* pois trata-se de uma das plataformas que atualmente garante melhores resultados em termos de simulação energética e que tem incorporado a capacidade de avaliar as componentes necessárias para a simulação de uma cobertura verde. Resumidamente, é um modelo unidimensional que permite calcular e prever temperaturas interiores, consumos de energia, fluxos de calor, sistemas de sombreamento, sistemas de aquecimento e arrefecimento, entre outros (*EnergyPlus, 2013*).

O modelo que simula o comportamento de uma cobertura verde foi desenvolvido por David J. Sailor em 2008 e aplicado no *software EnergyPlus*. O programa permite avaliar os principais efeitos da radiação solar sobre uma cobertura verde em termos de: convecção (*sensible heat*) do fluxo de calor nas superfícies de solo e vegetação; evapotranspiração (*latent heat*); condução do fluxo de calor na camada de substrato (*Conduction*); ondas de radiação incidentes na área de vegetação e de solo (*Longwave radiation and Shortwave radiation*). A Figura 4.16 ilustra todos estes fenómenos avaliados pelo programa de cálculo.

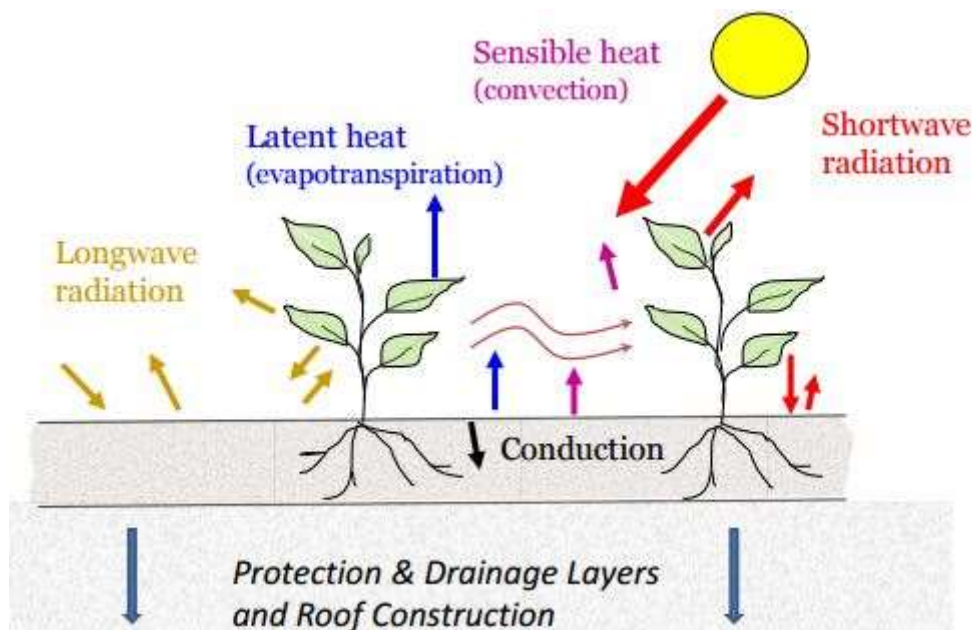


Figura 4.16 – Balanço energético de uma cobertura verde (Sailor *et al.*, 2012)

Este modelo não tem em conta os efeitos das camadas de impermeabilização, e de membranas de proteção, permitindo apenas avaliar as camadas referente de vegetação e do solo. Posteriormente pode se levar em conta o uso de isolamento térmico, mas ter-se-á de definir uma camada à parte e acrescentada no modelo de modo a contabilizar o seu efeito.

De seguida é apresentado resumidamente as considerações desenvolvidas por David J. Sailor que permitem levar em conta os fenómenos explícitos na Figura 4.13. A primeira equação representa o fluxo de calor na folhagem e tem em consideração a absorção da radiação de comprimentos de onda curta (radiação solar) e longa (infravermelhos), emissão da radiação da onda longa e ainda o fluxo de calor sensível (H_f) e latente (L_f).

$$F_t = \sigma_f [I_s (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (1)$$

onde:

- F_t – Representa o fluxo de calor na vegetação;
- $\sigma_f [I_s (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f T_f^4]$ – Termo considera a absorção e emissão da radiação solar e infravermelhos na folhagem;
- $\frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4)$ – Termo da equação que faz referência às trocas de radiação entre o solo e a vegetação;
- H_f – Representa o fluxo de calor por convecção (sensível) da folhagem;
- L_f – Representa a evapotranspiração (fluxo de calor latente) por parte da folhagem;
 - σ_f – Estima a área da cobertura tapada com vegetação. Varia consoante o valor de *LAI* (*Leaf Area Index*) uma vez que este é o parâmetro que projeta a área das folhas da vegetação por unidade de solo;
 - I_s – Radiação total do comprimento de onda curta;
 - α_f – Albedo da folhagem;
 - ε_f – Emissividade da folhagem;
 - ε_g – Emissividade do solo
 - ε_1 – Relação entre a emissividade da folhagem e do solo;
 - I_{ir} – Radiação total do comprimento de onda longa;
 - T_f – Temperatura da folhagem;
 - T_g – Temperatura do solo;
 - σ – Constante de Stefan – Boltzmann.

A segunda equação a ter em conta diz respeito ao fluxo de calor do solo e é influenciado pelas propriedades térmicas do solo e pela percentagem de solo não coberto por vegetação. Este balanço energético é calculado através da seguinte equação.

$$F_g = (1 - \sigma_f) [I_s (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \times \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (2)$$

onde:

- F_g – Representa o Fluxo de calor na superfície do solo;
- $(1 - \sigma_f) [I_s (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f T_f^4]$ – Termo considera a absorção e emissão da radiação solar e infravermelhos na camada do solo não coberto;
- $\frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4)$ – Termo da equação que faz referência às trocas de radiação entre o solo e a vegetação;
- H_g – Fluxo de calor sensível do solo;
- L_g – Fluxo de calor latente do solo;
- $K \times \frac{\partial T_g}{\partial z}$ – Condução do calor para o interior do substrato;
 - K – Condutibilidade térmica do solo;
 - z – Profundidade do solo;

O modelo dá ainda liberdade ao utilizador para especificar vários elementos, entre eles de destacar:

- Altura das plantas – É limitada a valores entre 0.01 m e 1 m;
- Índice de área de folhas (LAI) – Área projetada de folhas por unidade de área de superfície e tem de estar dentro do intervalo $0.001 < LAI < 5$;
- Espessura do solo – Tem de ter no mínimo 0.05 metros de espessura;
- Refletividade e Emissividade das folhas;
- Condutibilidade do solo seco;
- Capacidade de absorção térmica do solo.

Para consultar com mais detalhe todo este processo, assim como estudo detalhado dos parâmetros adotados no modelo de uma cobertura verde desenvolvido por Sailor deve-se consultar (Sailor, 2008). No caso de estudo serão ainda detalhados os parâmetros que se mantiveram em relação a este modelo.

4.5 Coeficiente de transmissão térmica e evapotranspiração

O coeficiente de transmissão térmica é utilizado para avaliar o comportamento térmico do edifício, sendo dependente das características da envolvente. Por exemplo para um solo com elevado teor de humidade este parâmetro tende a aumentar, podendo mesmo ter um índice de condutividade térmica duas vezes superiores ao de um solo seco (Sailor, 2008). Este aumento da condutividade térmica com o aumento da humidade é espectacular uma vez que a água é um melhor condutor térmico que o ar. No caso de estudo será considerado um índice de humidade do solo variável, na prática este valor de humidade é dependente dos sistemas de rega, sendo que se adotou um sistema automático que permite manter índices de humidade do solo sempre superiores a 40% ao longo de todo o ano.

A evapotranspiração tem a capacidade de desviar parte da energia exterior, diminuindo a temperatura da camada exterior e consequentemente diminuindo o fluxo de calor durante a época quente. A capacidade de evapotranspiração por parte da vegetação vai ser dependente das condições climatéricas locais e dos índices de humidade do solo.

Fica evidente que estes fenómenos serão diretamente influenciados pelas condições climatéricas locais, mais especificamente pela temperatura ambiente; vento; humidade do ar e a radiação solar. No caso de estudo será abordado mais detalhadamente a capacidade de absorção da radiação solar por parte da vegetação, pois será um dos fatores mais importantes na diminuição de energias de arrefecimento, e como vaira consoante o aumento da densidade da vegetação.

5 CASO DE ESTUDO

5.1 Introdução

Como já referido, este trabalho procura completar a falta de informação existente sobre coberturas verdes e os seus benefícios energéticos quando aplicado a uma estrutura residencial submetido ao clima de Coimbra (Csb). Uma vez que o consumo energético vai depender das características da cobertura, decidiu-se estudar inicialmente os consumos energéticos de 5 coberturas tipo onde se manteve todos os restantes aspetos estruturais do modelo inicial. Assim, consegue-se estudar a capacidade de poupança energética de cada cobertura e analisar desempenhos de cada uma para as diferentes estações consideradas: estação de aquecimento (Inverno) e estação de arrefecimento (Verão).

Ainda dentro deste capítulo, será abordado o desempenho energético de diferentes coberturas verdes consoante o sistema de irrigação considerado e a capacidade de absorção e reflexão de radiação solar que este tipo de solução fornece, diminuindo assim a temperatura da camada exterior.

Assim, será realizado um estudo paramétrico onde será mantida a espessura do solo e alterado os parâmetros relativos à altura de vegetação e ao parâmetro *LAI*. Deste modo consegue-se analisar os benefícios e as desvantagens de cada um destes parâmetros nas estações quentes e nas estações frias.

Por fim, será realizado um estudo complementar de eficiência energética das diferentes coberturas consideradas inicialmente, através da alteração das características da região climática. Para este caso será analisado o desempenho energético semanal (semana de projeto) e anual destas 5 soluções quando submetidas a um clima médio Csa Europeu. Desta forma será avaliada a importância da adaptação das características da cobertura consoante o local onde se insere.

5.2 Descrição dos parâmetros base do modelo

Antes de se passar à análise energética das várias soluções, é necessário descrever os sistemas passivos considerados para reduzir este mesmo consumo. Para tal, na estação de arrefecimento foi considerado que existe um sistema de ventilação natural com valor máximo de de 2.0 ac/h (2 renovações do volume de ar por hora) e um sistema de sombreamento que é ativado sempre que a temperatura interior for superior a 22.5 °C. Sendo este sombreamento é conseguido através de persianas que permitem proteger as janelas da luz solar.

Na estação aquecimento é admitida a ventilação natural mínima necessária e estipulada pelo regulamento nacional, ou seja, 0.6 ac/h. Uma vez que reduzir as trocas de ar com o exterior na época fria é crucial, pois é importante reter a temperatura ambiente interior, uma vez que na maior parte das vezes esta é superior à temperatura exterior. O sistema de sombreamento mantém-se ativo pois é programado de modo a que apenas seja utilizado quando a temperatura ambiente interior estiver perto do limite de comodidade. As Figura 5.1 e 5.2 representam a temperatura interior conseguida para a cobertura de referência através de recursos passivos para as semanas de projeto de Verão e de Inverno.

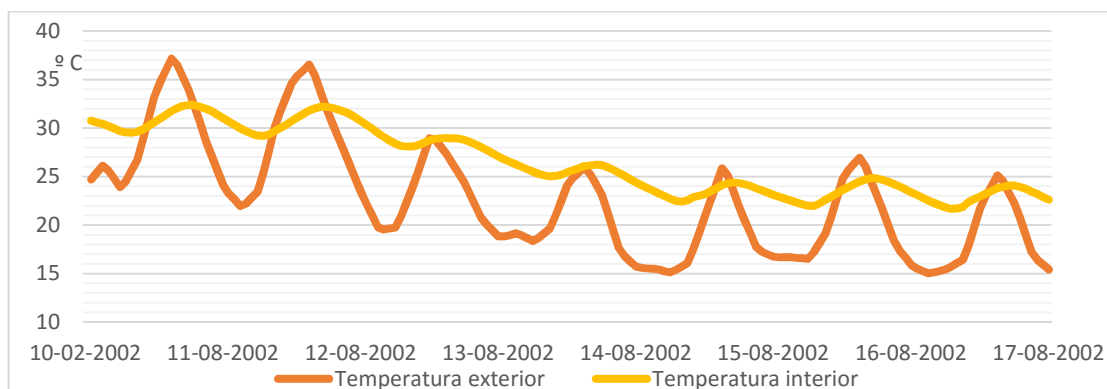


Figura 5.1 – Temperatura para a semana de projeto de Verão

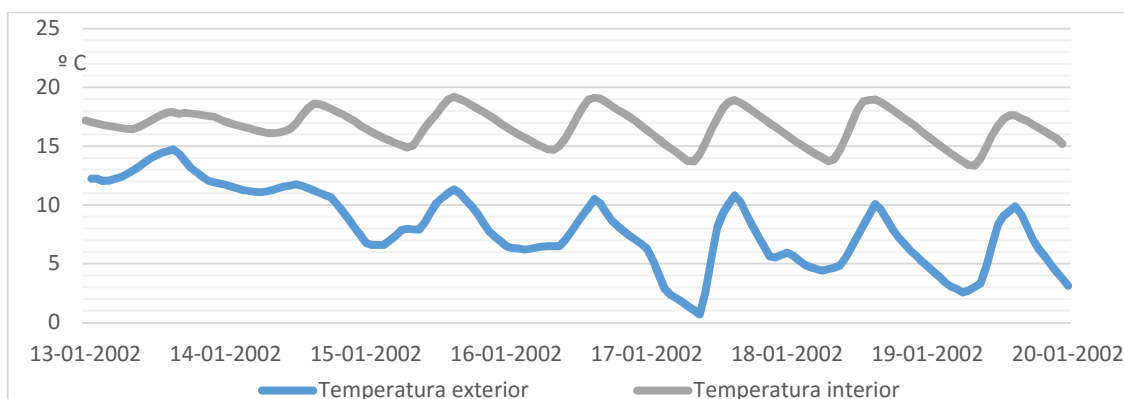


Figura 5.2 – Temperatura para a semana de projeto de Inverno

Além dos parâmetros básicos do modelo descritos nos parágrafos anteriores, o modelo terá em consideração o sistema de AVAC de modo a avaliar o consumo energético necessário para a temperatura no interior da moradia se mantenha dentro dos limites de comodidade considerados (20°C – 25°C).

5.3 Características das coberturas consideradas

Com base em estudos já realizados, os quais foram indicados na bibliografia consultada, é notório que as características de uma cobertura verde (solo, altura da vegetação e *LAI*) vão influenciar o desempenho térmico nas estações de aquecimento e arrefecimento. Como tal, serão apresentadas 5 coberturas distintas, 3 coberturas verdes com diferentes características, 1 cobertura de referência (cobertura clara) e 1 cobertura escura.

Como já referido, para além da cobertura de referência, e das 3 coberturas verdes consideradas neste estudo: 1 cobertura extensiva, 1 cobertura semi-intensiva e 1 cobertura intensiva, foi também avaliado o desempenho de 1 cobertura escura. Esta última considerou-se para que seja possível estudar o impacto da cobertura verde em edifícios com uma camada exterior com índices de reflexão e absorção solar mais desfavoráveis.

A Figura 5.3 apresentada as características da cobertura escura. Esta difere em relação à cobertura de referência em relação ao número de camadas consideradas. Do ponto de vista estrutural decidiu-se retirar as duas camadas superiores (camada de argamassa e camada de XPS) de modo a que seja possível instalar a cobertura verde.

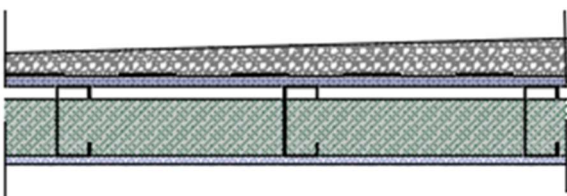
Cobertura escura	Material das camadas	Espessura [mm]
	Camada de betão leve	40 mm
	Membrana à prova de água	-
	Placa de OSB	18 mm
	Caixa de ar	25 mm
	Lã de Rocha	100 mm
	Placa de gesso cartonado	15 mm
U [W/(m ² K)]	0.320	

Figura 5.3 – Características da cobertura escura

A Figura 5.4 indica os dados considerados no modelo de modo a estudar os efeitos de uma cobertura verde. Esta figura é representativa de uma cobertura extensiva com 25 cm de espessura da camada de solo. De referir que o aspeto estrutural do modelo não foi tido em conta, pois não faz parte do foco deste trabalho, no entanto devido às dimensões que estas coberturas

apresentam, principalmente a intensiva (70 cm de espessura para a camada de solo), este aspeto deve ser tido em consideração na conceção da obra.

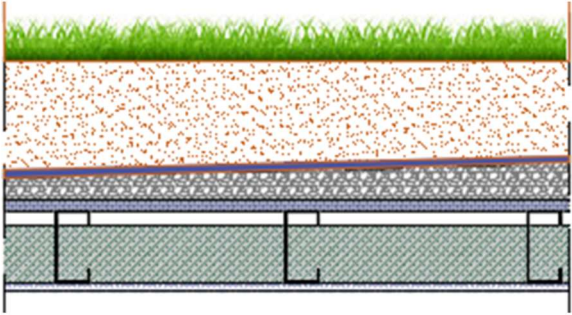
Cobertura extensiva	Material das camadas	Espessura
 <p>LAI 1 U [W/(m² K)] 0.267</p>	Altura das plantas	0.1 m
	Camada de solo	0.25 m
	Geotêxtil	-
	Camada de drenagem	-
	Camada protetora	-
	Membrana À prova de água	-
	Camada de betão leve	40 mm
	Placa de OSB	18 mm
	Caixa de ar	25 mm
	Lã de Rocha	100 mm
Placa de gesso cartonado	15 mm	

Figura 5.4 – Características da cobertura verde extensiva

O Quadro 5.1 indica as características das diferentes coberturas verdes, sendo que se mantêm as restantes camadas discriminadas na Figura 5.4.

Quadro 5.1 – Características das diferentes coberturas verdes consideradas

Cobertura	Leaf Area Index (<i>LAI</i>)	Camada de solo [m]	Altura das plantas [m]	Sistema de irrigação <i>SMART</i> [m/h]	U [W/m ² K]
Extensiva	1.00	0.25	0.10	0.00025	0.267
Semi- intensiva	2.50	0.35	0.50	0.00025	0.250
Intensiva	5.00	0.70	1.00	0.00025	0.205

* SMART - O sistema de rega funciona todo o dia, mas só é ativo quando a humidade do solo é inferior a 40%

O sistema de rega referido no Quadro 5.1 é detalhado no sub-capítulo 5.4, no entanto, é de ter em conta que a irrigação foi considerada constante ao longo do ano para todas as coberturas verdes e corresponde a uma rega de 6 mm/dia, que é o valor recomendado por (Silva, 2041) para o clima português. Deste modo consegue-se fazer uma análise comparativa de resultados mais eficaz, no entanto, num modelo mais avançado ter-se-ia de aumentar o sistema de rega consoante o aumento das características da cobertura verde, pois o aumento da vegetação e da camada do solo irão requerer na prática mais água do que camadas com menores dimensões.

O Quadro 5.2 apresenta as propriedades detalhadas da camada exterior da cobertura em cada caso analisado. Apenas é detalhada as propriedades desta camada pois será a maior responsável por ser tratar da camada exposta à radiação solar. As características dos materiais são dadas pelo programa e podem ser consultados na base de dados do mesmo.

Quadro 5.2 – Características das camadas exteriores das diferentes coberturas

Características da camada exterior	Vegetação e <u>solo</u>	Referência (argamassa)	Escura (betão leve)
Absorção Térmica	<u>0.90</u>	0.90	0.90
Absorção Solar	<u>0.70</u>	0.40	0.60
Absorção Visível	<u>0.70</u>	0.60	0.60
Condutividade [W/(m.k)]	0.40	0.88	0.38
Calor específico [J/(kg.k)]	1000.00	896.00	1000.00
Massa volúmica [kg/m ³]	500.00	2800.00	1200.00
Refletividade da folha	0.22	-	-
Emissividade da folha	0.95	-	-
Mínima resistência estomática [s/m]	100.00	-	-
Teor de humidade de saturação	0.50	-	-
Teor de humidade residual	0.01	-	-
Teor de humidade inicial	0.15	-	-

Por fim, o aspeto final da cobertura verde simulada no modelo de cálculo está representada na Figura 5.5.



Figura 5.5 – Modelo computacional representativo da moradia *CoolHaven* para o estudo de uma cobertura verde

5.4 Análise dos tipos de irrigação

Como referido anteriormente, o *software* permite escolher o tipo de rega que se pretende instalar no edifício e assim estudar o impacto que este terá no estudo da eficiência energética das diferentes soluções. As duas hipóteses consideradas no modelo são: um sistema de rega programado para estar ativo todo o dia com um caudal constante, designado por *Schedule*, e um sistema de rega inteligente que apenas é ativado quando o teor de humidade do solo for inferior a 40% da sua capacidade de saturação, mas a partir do momento que é ligado terá o caudal constante até à meia noite desse mesmo dia. Este último designa-se por *SmartSchedule* e será o modelo de rega considerado no restante estudo, mas primeiro é necessário avaliar os efeitos dos diferentes sistemas de rega para diferentes caudais.

Sendo assim, utilizaram-se os valores de rega diária aconselhados por (Sailor, 2008), (Silva, 2014) e ainda o valor dado pelo modelo de cálculo, tendo caudais de 0.00006 m/h, 0.00025 m/h e 0.01 m/h respetivamente. Esta análise foi realizada apenas para a cobertura verde com as características intermédias, ou seja, a semi-intensiva, apresentando-se também as outras duas coberturas em estudo, cobertura de referência e cobertura escura, de modo a conseguir-se fazer um estudo comparativo das diferentes soluções. As Figuras 5.6 e 5.7 avaliam o consumo total de energia de aquecimento e de arrefecimento (através do sistema de AVAC) para as semanas de projeto nas duas estações consideradas, Inverno e Verão.

Para este estudo foi considerado um sistema de AVAC com temperaturas de *Set Point* de 20 °C e 25 °C para as estações de Inverno e de Verão, respetivamente. Foi ainda estimado um equipamento com um COP (coeficiente de desempenho) de 3 para o aquecimento e 4 para o arrefecimento, deste modo é possível avaliar o consumo energético final em cada caso de estudo para o clima considerado.

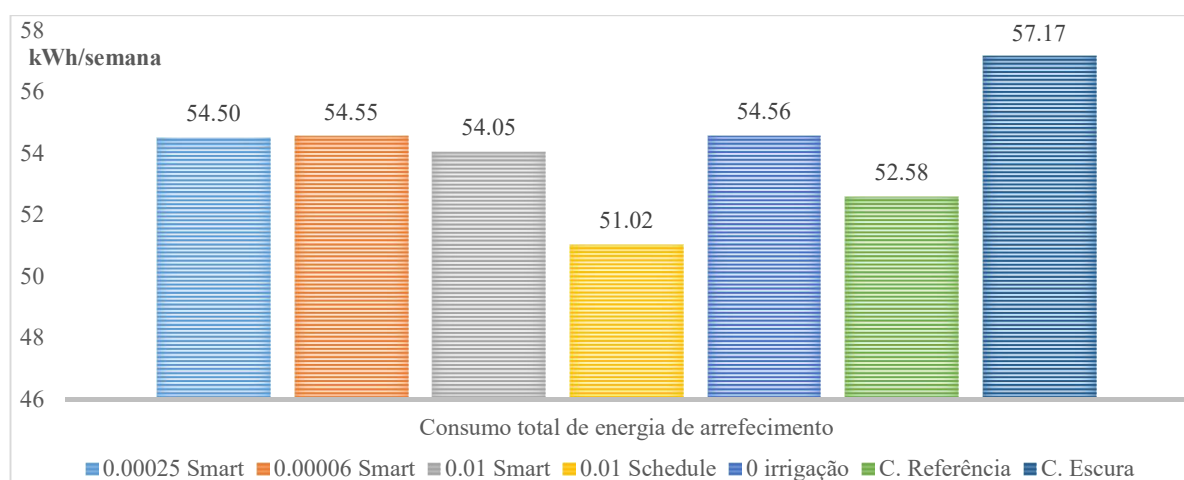


Figura 5.6 – Consumo de energia de arrefecimento durante a semana de projeto de Verão

É notório que o aumento do caudal do sistema de rega leva a mais poupanças energéticas. Isto é mais evidente no sistema *Schedule*, pois foi programado de modo a ter um caudal constante de 0.01 m/h ao longo de todos os dias da semana, do que no sistema *Smart* que apenas é ligado quando a humidade do solo for reduzida. Esta poupança energética está associada ao aumento da humidade da água do solo que irá refrescar a cobertura e ao mesmo tempo aumenta a capacidade de evapotranspiração das plantas.

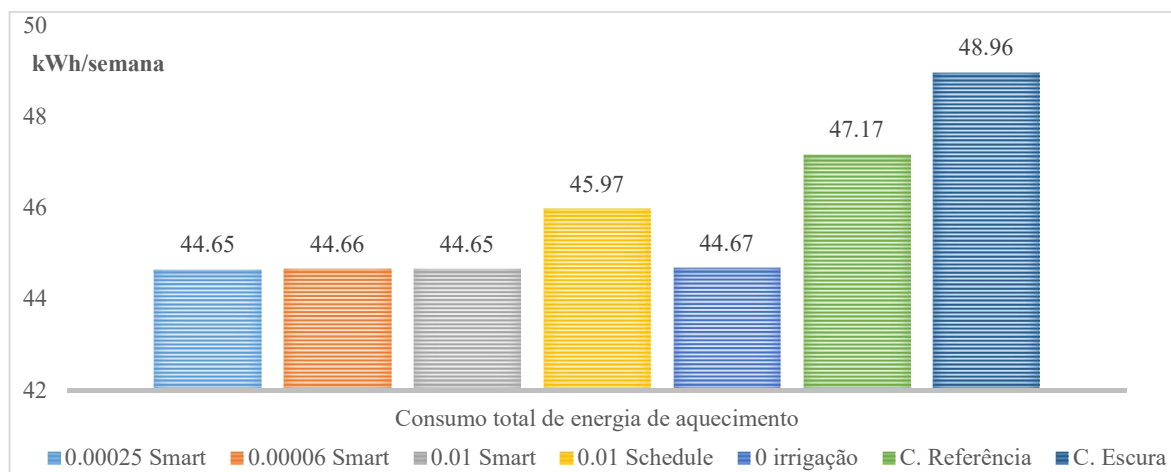


Figura 5.7 – Consumo de energia de aquecimento durante a semana de projeto de Inverno

Para o Inverno verifica-se o oposto, ou seja, o aumento do caudal irá aumentar o consumo energético, muito devido ao aumento da humidade do solo que irá aumentar a condutividade térmica do mesmo, e uma vez que no inverno se deve reduzir as trocas de calor com o exterior, a camada de solo será mais eficaz quanto mais estiver.

5.5 Análise energética das diferentes coberturas

5.5.1 Temperatura da superfície exterior da cobertura no verão

As seguintes figuras representam a variação da temperatura da superfície da cobertura ao longo da semana de projeto de Verão, tendo sido retiradas diretamente do *software EnergyPlus*.

As figuras 5.8 e 5.9 dizem respeito à cobertura de referência e à cobertura escura, respetivamente. Os valores extremos para cada caso estão presentes no Quadro 5.3.

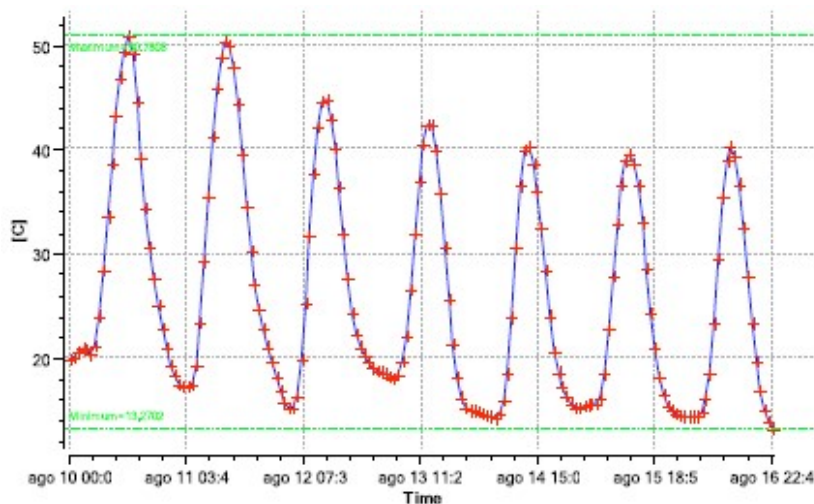


Figura 5.8 – Temperatura exterior da cobertura de referência: semana de projeto de verão

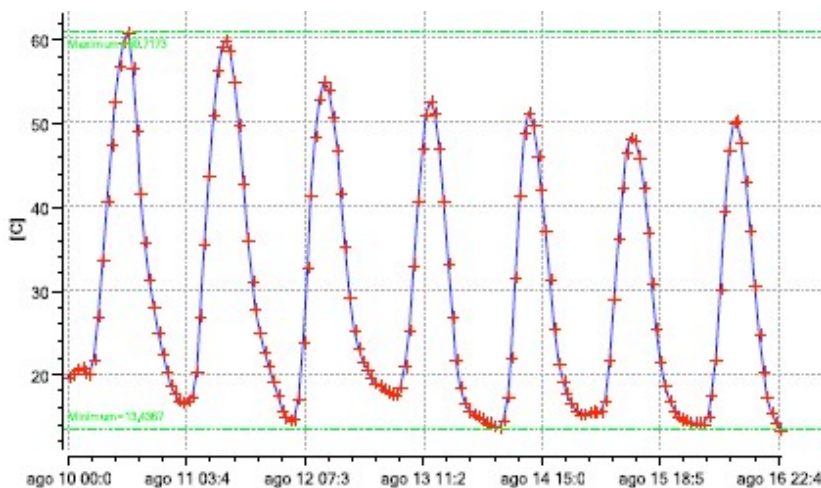


Figura 5.9 – Temperatura exterior da cobertura escura: semana de projeto de verão

As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 dizem respeito à temperatura verificada na superfície (solo) da cobertura verde extensiva, semi-intensiva e intensiva, respetivamente.

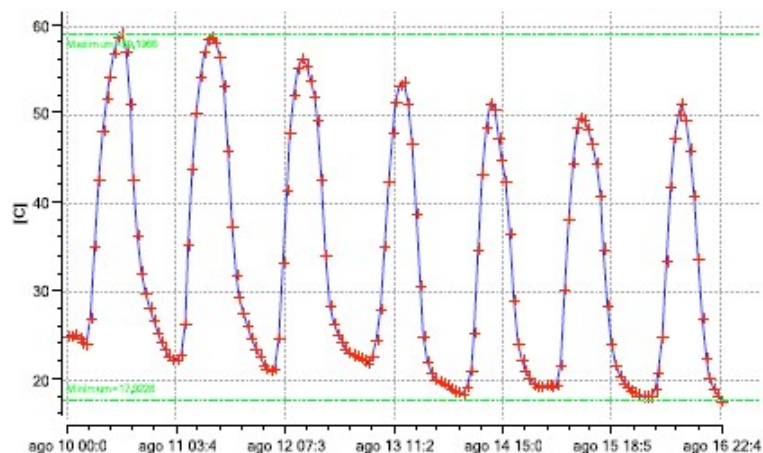


Figura 5.10 – Temperatura exterior da cobertura extensiva: semana de projeto de verão

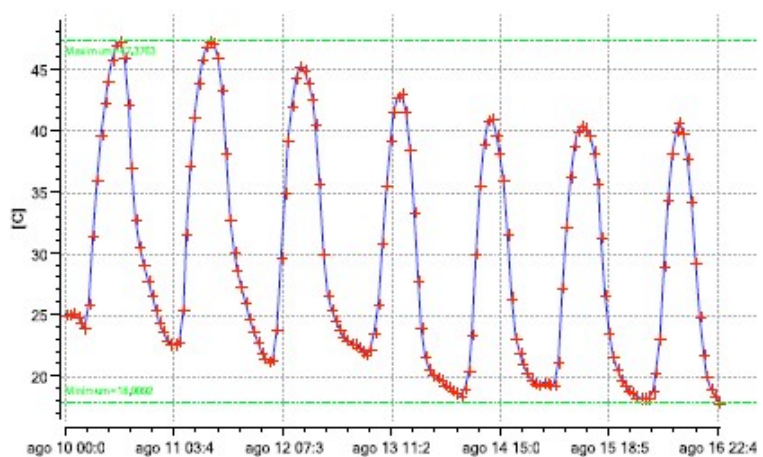


Figura 5.11 – Temperatura exterior da cobertura semi-intensiva: semana de projeto de verão

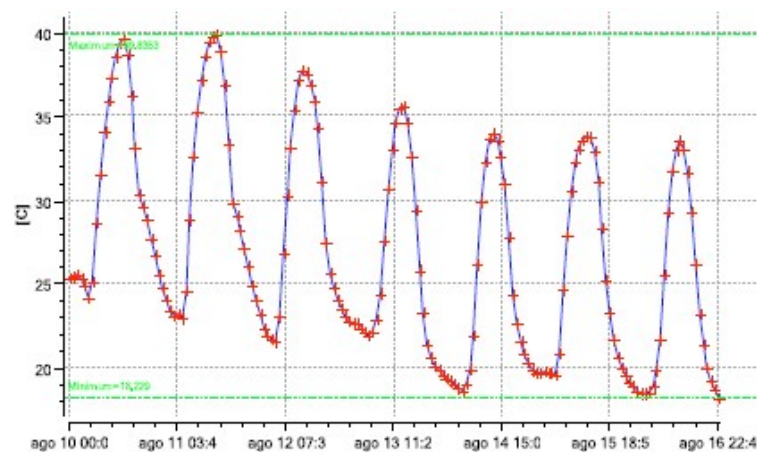


Figura 5.12 – Temperatura exterior da cobertura intensiva: semana de projeto de verão

O Quadro 5.3 ilustra os valores máximos e mínimos da temperatura presentes nos gráficos em cima expostos.

Quadro 5.3 – Temperaturas extremas na superfície das coberturas: semana de projeto de verão

	Temperatura máxima [°C]	Temperatura mínima [°C]
C. Extensiva	59.19	17.92
C. Semi-intensiva	47.38	18.01
C. Intensiva	39.84	18.23
C. Referência	50.78	13.27
C. Escura	60.71	13.44

A cobertura extensiva é a única que apresenta pouca capacidade de diminuição da temperatura da superfície, isto deve-se ao facto de a vegetação não ser densa o suficiente para impedir que a radiação solar esteja em contacto com o solo. Como seria de esperar a cobertura de referência apresenta temperaturas mais reduzidas do que a cobertura escura, isto acontece devido às propriedades do material (referente à capacidade de absorção solar) constituinte da camada exterior de cada um dos casos.

Nas Coberturas verdes semi-intensiva e intensiva, devido aos índices mais elevados de vegetação, consegue-se obter uma temperatura da superfície exterior inferior à da camada de referência em ambos os casos.

5.5.2 Consumo energético: Verão e Inverno

As seguintes figuras apresentam os consumos energéticos para as duas semanas mais desfavoráveis durante o ano, uma relativa ao período de Inverno e outra ao período de Verão.

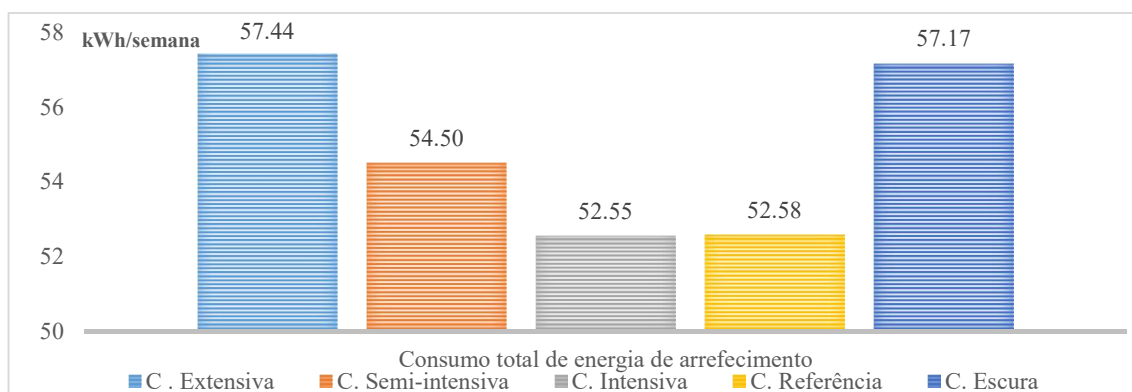


Figura 5.13 – Consumo de energia: semana de projeto de Verão

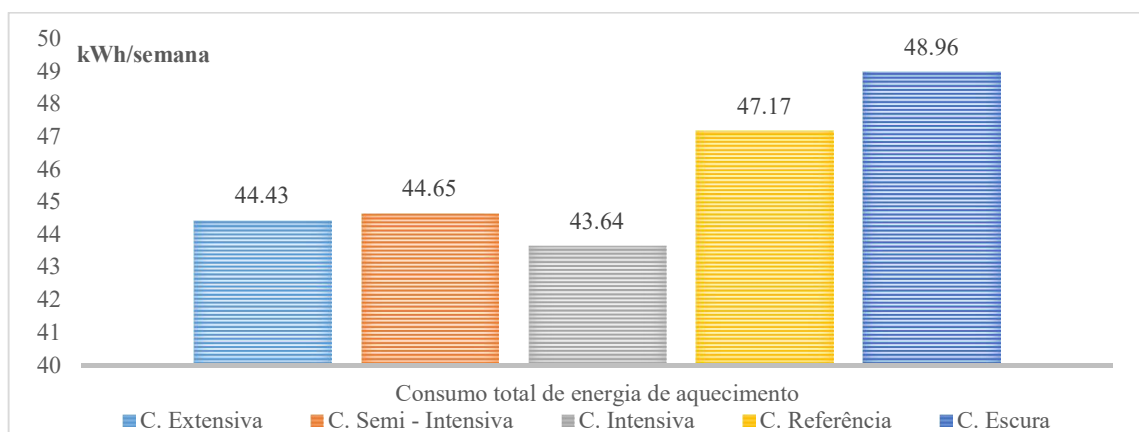


Figura 5.14 – Consumo de energia: semana de projeto de Inverno

Como já seria de esperar, entre as três coberturas verdes consideradas a que tem um desempenho menos satisfatório é a extensiva, sendo uma solução pouco eficaz nos dias mais quentes, pois os seus baixos índices de vegetação, relativamente à altura das plantas e ao índice de área das folhas (*LAI*), não permitem que os processos de arrefecimento da camada do solo sejam realizados com sucesso. No entanto no Inverno, estas mesmas razões são o ponto mais favorável da cobertura extensiva, devido à baixa capacidade de interceptar radiação solar por parte da vegetação, esta será absorvida maioritariamente pelo solo, aumentando a temperatura do mesmo.

Por outro lado, a cobertura intensiva revela-se ser uma boa opção, apresentando um comportamento similar ao da cobertura de referência na época quente e no inverno tem uma capacidade relativamente superior, em relação a todas as outras escolhas, para reduzir o consumo energético. No Inverno, mesmo com o aumento da área de vegetação (*LAI*) na cobertura intensiva, consegue-se reduzir os consumos energéticos em comparação com as outras coberturas. Isto acontece devido ao aumento da espessura da camada do solo conseguindo-se um aumento do isolamento térmico, reduzindo assim as trocas de calor com o exterior.

A cobertura semi-intensiva é menos eficiente do que a cobertura intensiva, no entanto em relação à extensiva apresenta consumos energéticos mais reduzidos na época de arrefecimento, muito devido à vegetação presente nesta, que reduz o aquecimento do solo (Figura 5.11), sendo que no Inverno este excesso de vegetação reduzirá a absorção da temperatura por parte do solo reduzindo a capacidade de a cobertura aproveitar o calor proveniente da radiação solar. De modo a se perceber qual destas soluções apresenta melhor comportamento ao longo do ano será analisado os consumos energéticos mensais e anuais no seguinte sub-capítulo.

5.5.3 Consumo energético anual

De seguida, de modo a avaliar o consumo energético total das diferentes soluções é apresentada a Figura 5.15 que permite perceber o comportamento em termos energéticos das diferentes soluções.

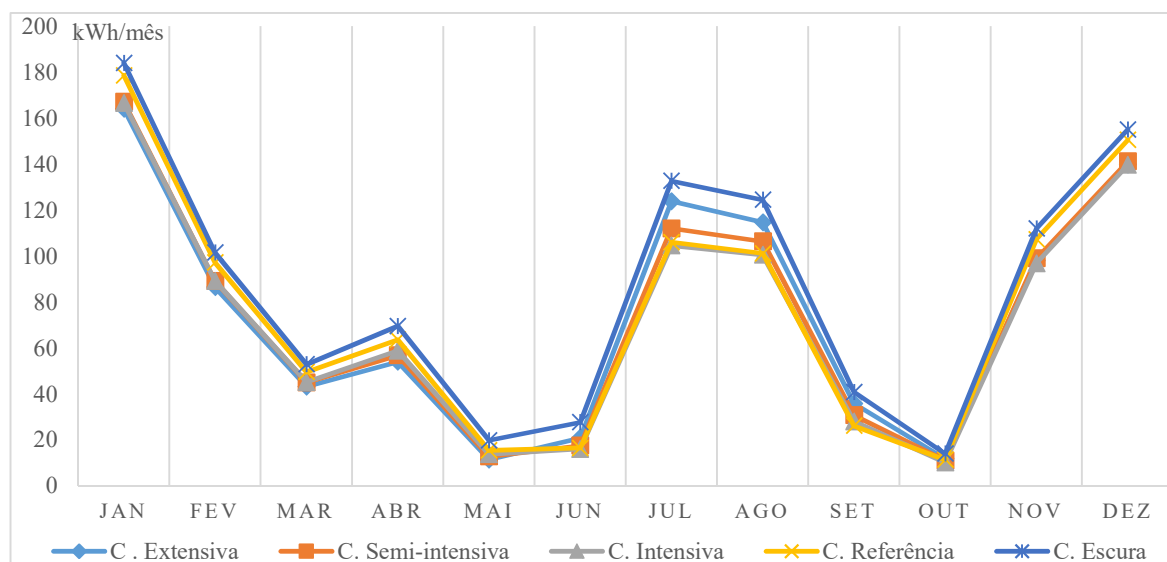


Figura 5.15 – Consumo de energia mensal das diferentes soluções

A cobertura extensiva apenas apresenta um comportamento pouco eficaz quando submetida a temperatura elevadas como as verificadas na semana de projeto de verão. Para os restantes dias da época quente a cobertura extensiva apresenta um consumo energético sempre inferior ao da cobertura escura, como seria de esperar pelo estudo prévio efetuado sobre o tema.

Por fim a Figura 5.16 apresenta o consumo energético anual para cada solução, que comprova que todas as soluções verdes analisadas apresentam uma redução final no consumo energético considerável quando comparadas com cobertura escura e a de referência.

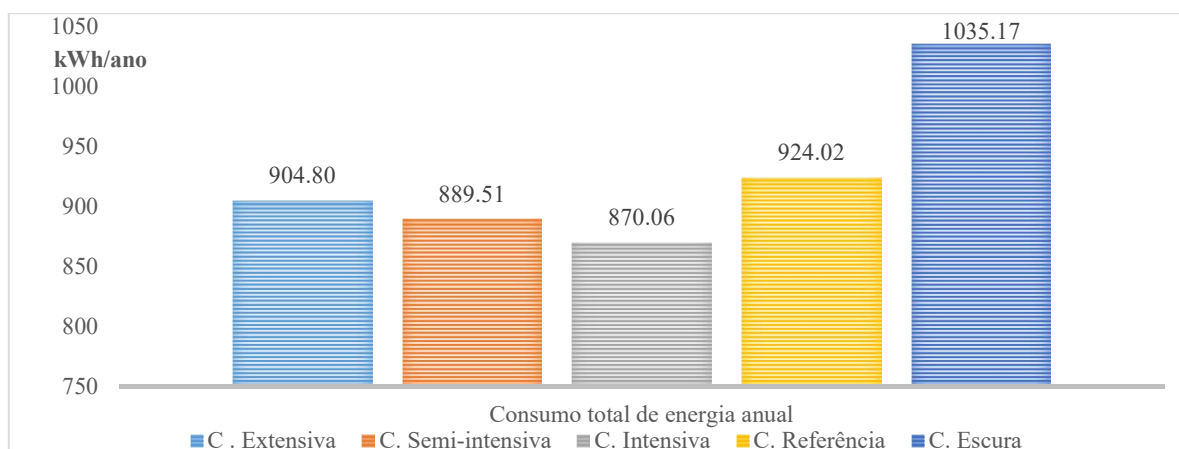


Figura 5.16 – Consumo de energia anual das diferentes soluções

5.5 Estudo paramétrico

De modo a se perceber o comportamento da cobertura verde consoante o tipo de vegetação adotada, foi efetuado um estudo que mostra os benefícios de uma correta escolha para a camada de vegetação no que toca a *LAI* e à altura da vegetação desejada. O Quadro 5.3 apresenta os 6 casos estudados para as semanas de projeto de Verão e de Inverno que permitem analisar o consumo energético de sistemas de aquecimento e de arrefecimento para cada solução.

Quadro 5.4 – Casos analisados com variação da altura das plantas e *LAI*

Caso	Espessura do solo [m]	<i>LAI</i> (<i>Leaf Area Index</i>)	Altura das plantas [m]
1º Caso	0.35	2.5	0.1
2º Caso			0.5
3º Caso			1
4º Caso		1	0.5
5º Caso		2.5	
6º Caso		5	

A Figura 5.17 apresenta os resultados obtidos para os primeiros 3 casos onde são mantidas as características da cobertura semi-intensiva e avaliado o consumo energético através da variação da altura das plantas.

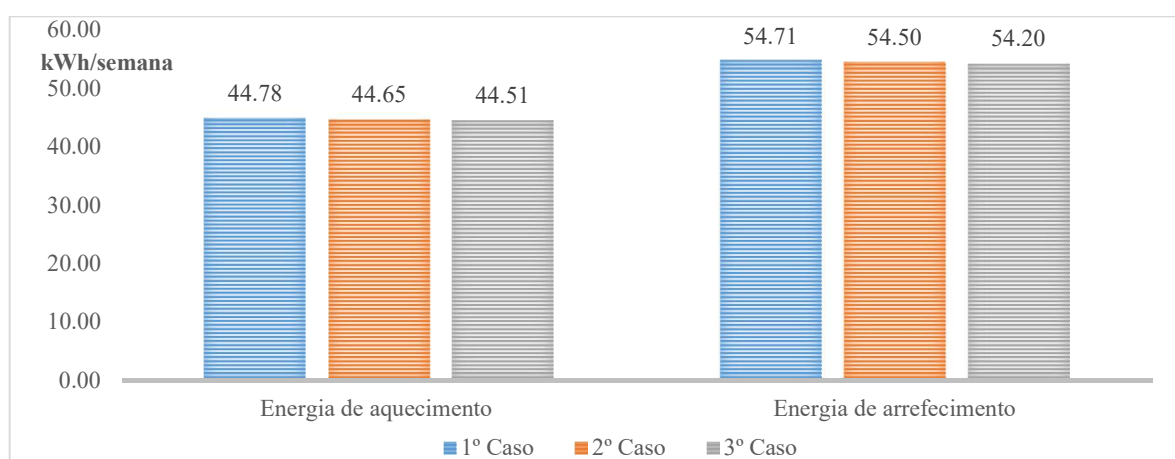


Figura 5.17 – Consumo de energia através da variação da altura das plantas

Como já seria de esperar a altura das plantas não será um parâmetro muito relevante quando considerado isolado, ou seja, aumentando a altura das plantas e não aumentando a área de vegetação não é possível otimizar a capacidade da vegetação de modo a reduzir o consumo energético.

A Figura 5.18 ilustra os resultados obtidos para as três soluções consideradas onde se varia o parâmetro *LAI*.

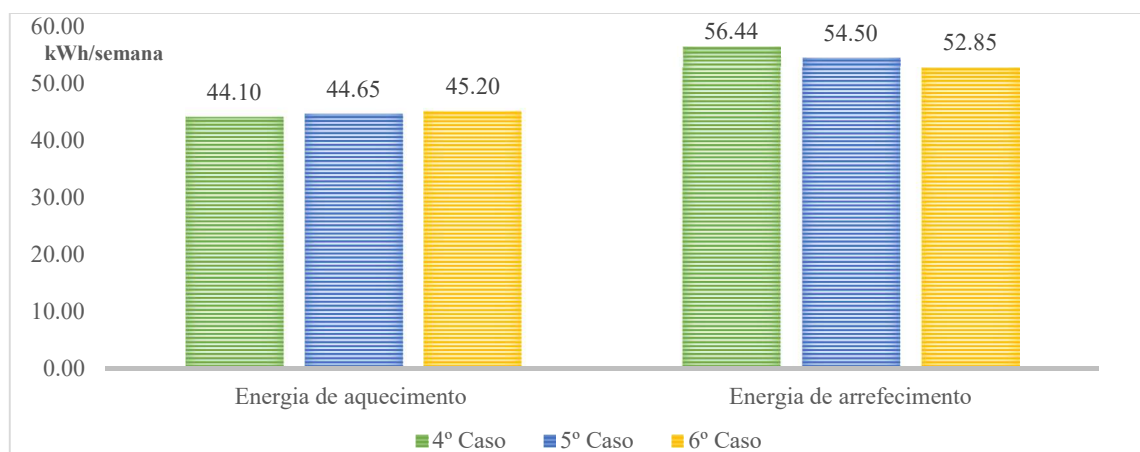


Figura 5.18 – Consumo de energia através da variação de *LAI*

Neste caso, com o aumento da *LAI* para a época quente, é conseguido uma redução da energia consumida quanto maior for, isto deve-se à capacidade da vegetação para absorver e refletir a radiação solar, permitindo reduzir a temperatura de superfície da cobertura (solo), e consequentemente reduzir a transferência de calor que liga a cobertura ao interior do edifício. Por outro lado, este aumento torna-se desfavorável nas épocas mais frias, pois o aumento da área de sombreamento impedirá que o solo absorve radiação e diminuindo assim as trocas de calor pela cobertura, o que será benéfico para climas frios.

5.6 Análise para a região climática Csa

Por fim, foi realizado um estudo da eficiência energética dos 5 casos considerados anteriormente, mas agora submetidos a um clima Csa médio Europeu. Este clima médio foi obtido pela média de 5 cidades Europeias, classificadas com clima Csa, Atenas, Lisboa, Madrid, Marselha e Roma (Gervásio *et al.*, 2014).

As figuras 5.19 - 5.22 ilustram as condições climáticas Csa consideradas no modelo. De notar que em comparação com o clima verificado em Coimbra, para as semanas de projeto, este clima médio Csa é um clima mais quente e seco durante o Verão, e no Inverno caracteriza-se por ter uma temperatura média inferior.

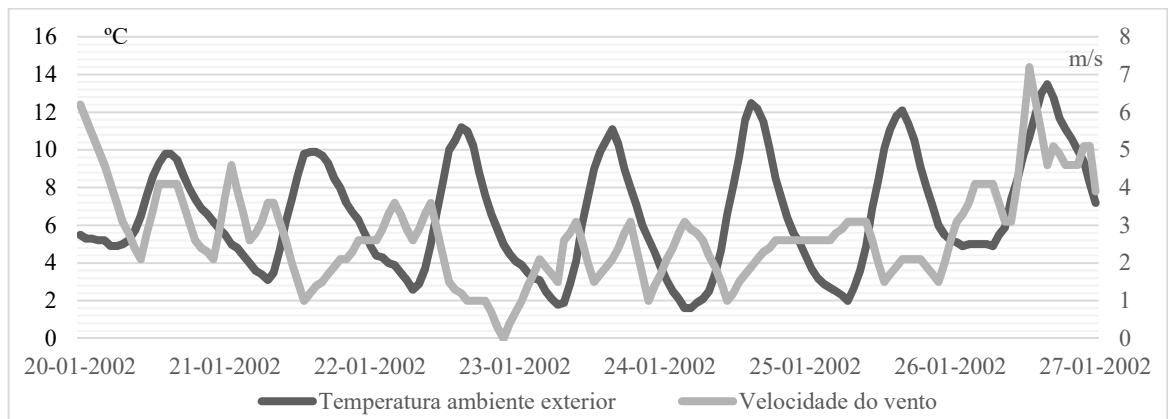


Figura 5.19 – Velocidade do vento e Temperatura exterior: semana de projeto de Inverno (clima Csa)

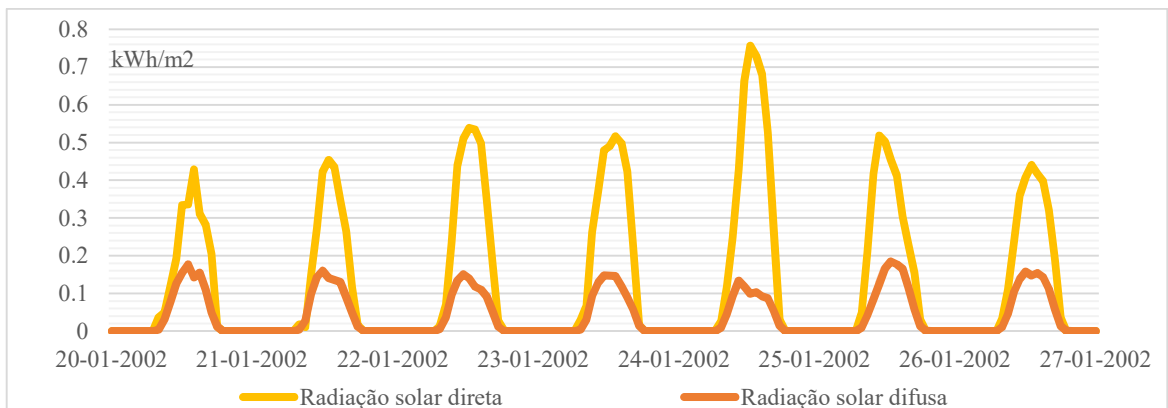


Figura 5.20 – Radiação solar: semana de projeto de Inverno (clima Csa)

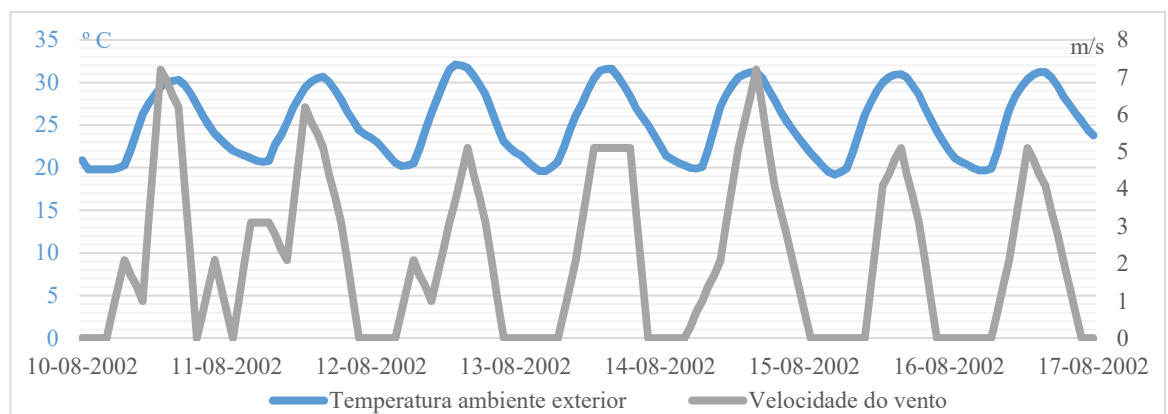


Figura 5.21 – Velocidade do vento e Temperatura exterior: semana de projeto de Verão (clima Csa)

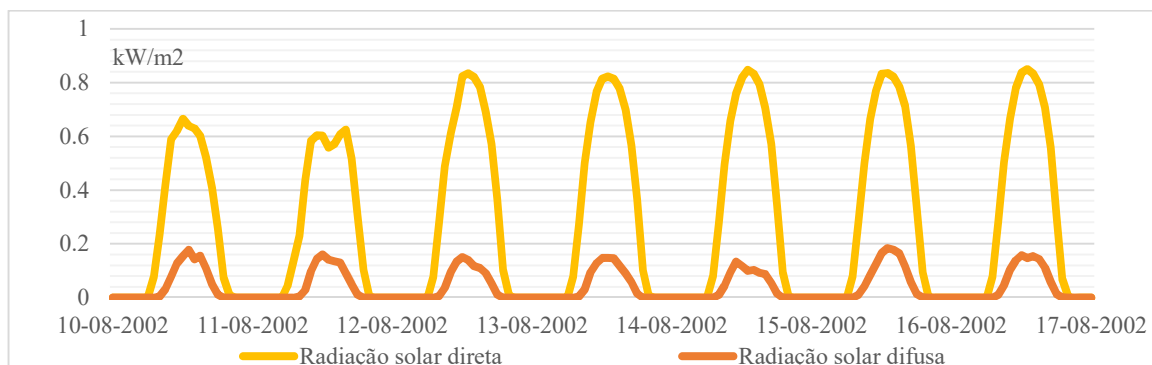


Figura 5.22 – Radiação solar: semana de projeto de Verão (clima Csa)

De notar ainda os elevados índices de radiação solar verificados na semana de projeto de Inverno em comparação com o clima Csb. Este aumento da radiação irá proporcionar às coberturas verdes, principalmente à extensiva, alcançar um maior ganho energético passivo quando comparado com as coberturas de referência e escura, devido ao aumento da capacidade de absorção solar por parte do solo. Os resultados do consumo energético para as semanas de projeto de Inverno e Verão estão presentes nas Figuras 5.23 e 5.24, respetivamente,

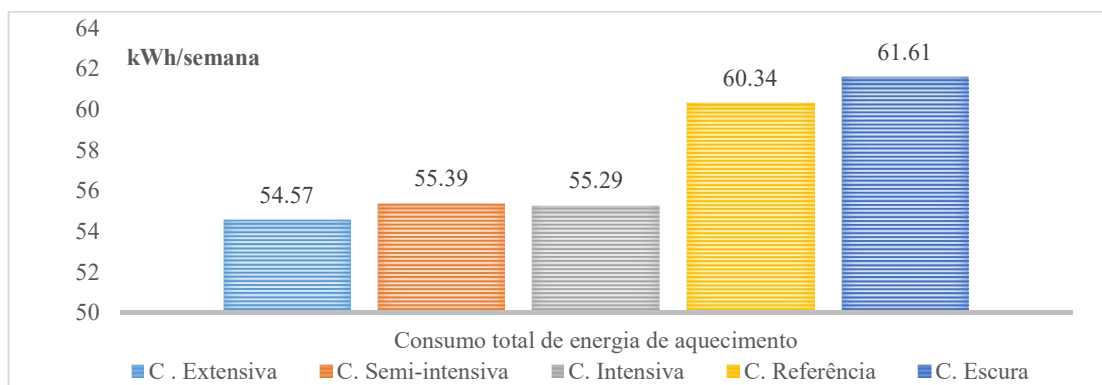


Figura 5.23 – Consumo de energia: semana de projeto de Inverno (clima Csa)

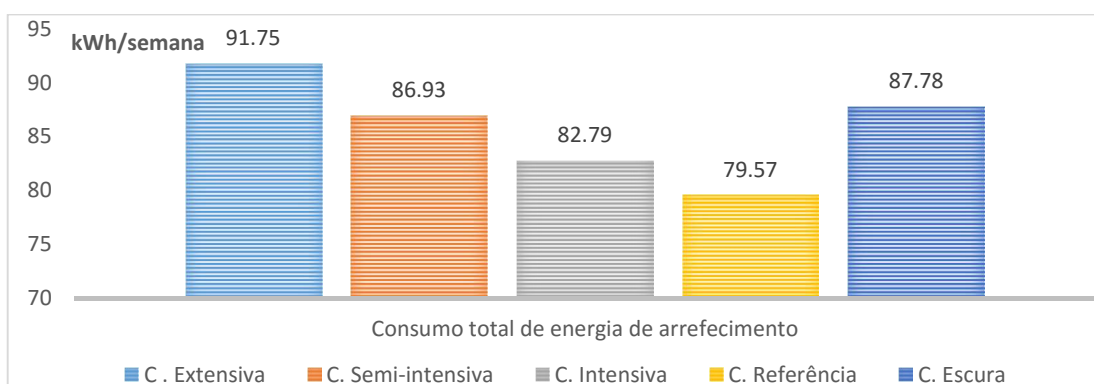


Figura 5.24 – Consumo de energia: semana de projeto de Verão (clima Csa)

Em comparação com os resultados obtidos para o clima de Coimbra, nota-se que de um modo geral o consumo energético das cinco soluções é superior, isto acontece devido à existência de condições climáticas mais desfavoráveis, no entanto verifica-se um melhoramento da capacidade da cobertura Extensiva na semana de projeto de Inverno em comparação com solução de referência. No clima Csb verifica-se uma redução para esta semana de 5.8% quando comparado com a cobertura de referência, enquanto que para o clima Csa esta redução ronda os 9.6%. Esta diminuição deve-se à existência de maiores índices de radiação solar no Inverno no clima Csa em comparação com o primeiro clima considerado.

Para o verão os resultados não são tão satisfatórios, demonstrando que a temperaturas elevadas a vegetação não tem capacidade melhorar a eficiência energética em comparação com a solução de referência. De referir ainda que, pelo mesmo facto que a cobertura extensiva é a que apresenta um melhor comportamento no Inverno, no verão esta terá um desempenho débil, pois absorve demasiada radiação solar, aumentando assim as trocas de calor pela cobertura. As Figuras 5.25 e 5.26 apresentam os valores mensais e anuais, respetivamente, de consumo energético total para as diferentes soluções.

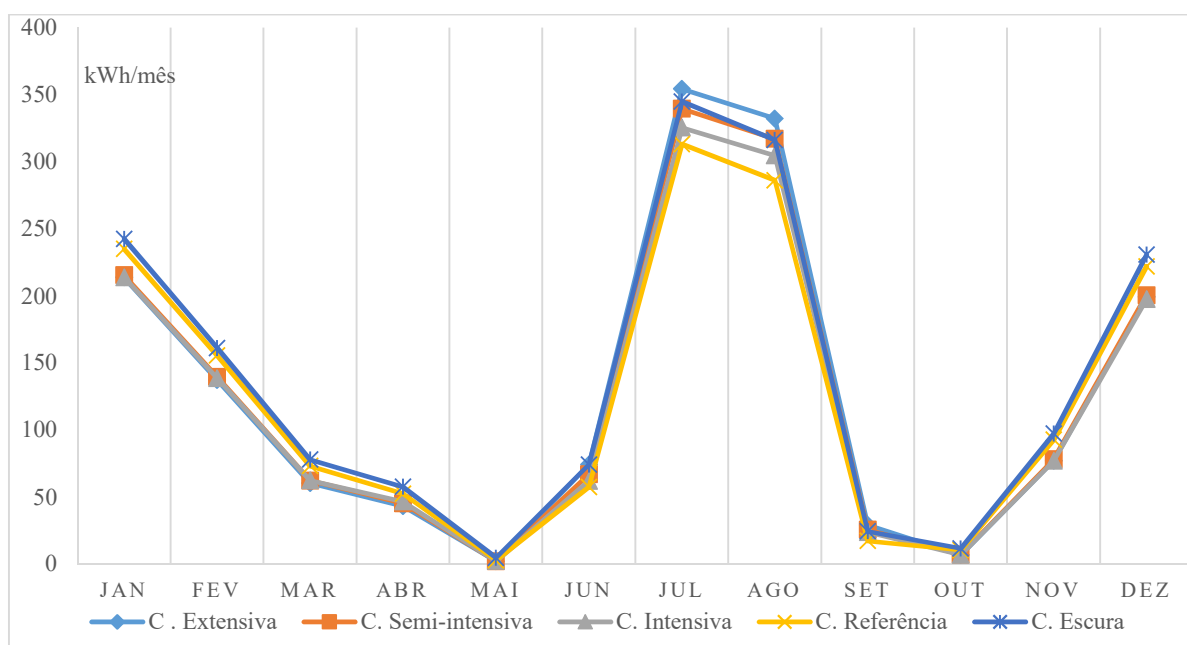


Figura 5.25 – Consumo de energia mensal das diferentes soluções (clima Csa)

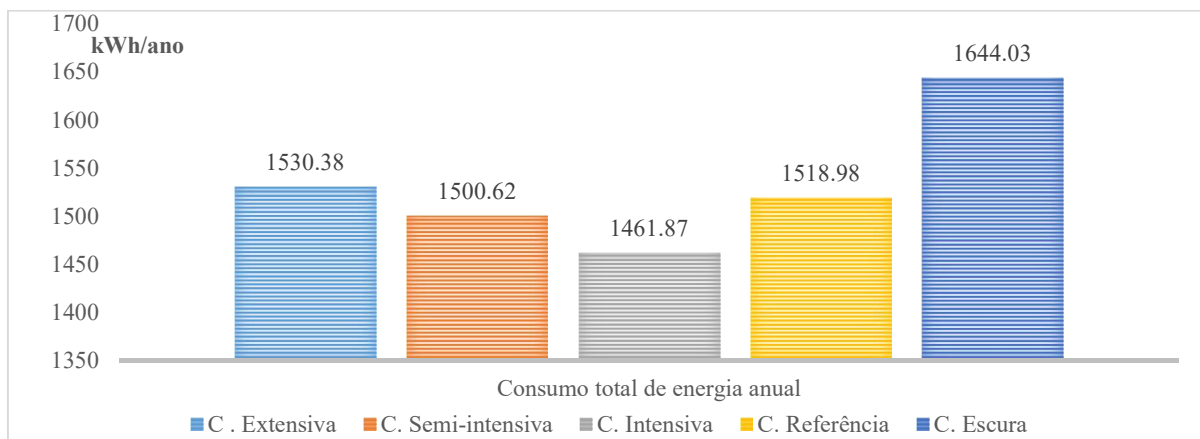


Figura 5.26 – Consumo de energia anual das diferentes soluções (clima Csa)

Apesar de os ganhos energéticos não serem tão evidentes, regista-se mesmo assim para a cobertura intensiva em comparação com a cobertura de referência, uma redução anual de energia consumida de 3.8%, enquanto que para o clima Csb a redução é de 5.8%.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Este trabalho começa com uma breve revisão do paradigma atual vivido em termos ambientais, abordando principalmente a escassez de recursos fósseis e o aumento dos poluentes que irão afetar o clima, e como uma melhor eficiência energética através de soluções passivas pode melhorar estes aspetos, principalmente através da redução do consumo destes recursos e a consequente diminuição de emissão de poluentes.

A eficiência energética em edifícios tem sido um tema muito debatido, surgindo limites em termos de consumos energéticos cada vez mais rigorosos, tendo-se inclusive criado algumas normas que visam metas a atingir em relação à redução do gasto energético. Neste sentido surgiu a construção passiva, que aborda algumas medidas que permitem alcançar esta redução energética tão desejada.

As coberturas verdes surgem como solução a ter em conta para reduzir os consumos energéticos em edifícios e ao mesmo tempo apresentam características que permitem reduzir os impactos ambientais provocados pelas coberturas tradicionais, como má gestão de águas pluviais através do aumento de áreas impermeáveis, e o fenómeno “*Ilha de calor*”.

O caso de estudo abordou a análise da eficiência energética, de um edifício residencial construído em *LSF CoolHaven*, em relação a gastos de energia de aquecimento e arrefecimento ao longo do ano para diferentes tipos de coberturas.

Para se realizar este estudo recorreu-se aos softwares *DesignBuilder* e *EnergyPlus* que através de um modelo numérico permitem simular as diferentes coberturas consideradas em termos de consumos energéticos e estimar as temperaturas da superfície da cobertura. Em relação a este modelo foi ainda efetuado um estudo de validação do clima dado pela base de dados do programa para Coimbra (Csb).

Inicialmente foram estudados vários tipos de irrigação com diferentes caudais, adotando-se um sistema de rega designado por *SmartSchedule* com um caudal de 6 mm/dia. Este sistema caracteriza-se por ter a capacidade de medir a teor de humidade do solo, sendo que apenas é ativo, o sistema de rega, quando esta humidade for inferior a 40%. Este estudo permitiu ainda perceber que durante o Verão a vegetação em conjunto com o aumento do sistema de irrigação

levará a menor consumos energéticos. No entanto, no Inverno o solo será o responsável por reduzir as perdas de calor do interior. Portanto quanto mais seco este for melhor será a sua capacidade de isolamento térmico.

Posteriormente foi realizado o estudo do desempenho energético de cinco coberturas: extensiva; semi-intensiva; intensiva; escura; e de referência (clara). Em termos da análise feita para a capacidade da vegetação arrefecer a superfície da cobertura, revela-se que quanto maior a área de sombreamento maiores são os ganhos energéticos conseguidos. A cobertura intensiva é a que apresenta um melhor desempenho nesta análise, tendo temperaturas mais baixas na superfície do solo, 11 °C em relação à cobertura de referência e de 19 °C em relação à cobertura extensiva. Conclui-se ainda que baixos índices de vegetação, como os verificados na camada extensiva, originam uma temperatura de superfície muito semelhante à da cobertura escura.

Foi ainda realizada uma análise do desempenho das diferentes coberturas para as semanas de projeto e posteriormente uma análise anual, revelando que para o clima verificado em Coimbra (Clima Csb) todas as coberturas verdes consideradas têm um melhor desempenho energético em comparação com a cobertura escura e a de referência. É de ter em conta que apesar de a cobertura extensiva apresentar elevados consumos energéticos na época mais quente, esta terá um desempenho no Inverno capaz de equilibrar os gastos energéticos despendidos na época de arrefecimento. Sendo então um tipo de cobertura a ter em conta principalmente em reabilitações, pois não exige um esforço estrutural extra para a suportar.

O estudo paramétrico permitiu concluir que o correto uso da camada de vegetação pode levar a ganhos energéticos consideráveis. Por exemplo, com o aumento do *LAI* é conseguido uma diminuição de energia consumida no Verão, mas no Inverno este aumento torna-se desfavorável, pois impede que o solo absorva radiação solar.

Por fim, foi realizado um estudo do desempenho destas cinco coberturas, mas num clima médio Csa. Revelando que sem a adaptação das diferentes camadas da cobertura verde a eficiência energética do edifício fica comprometida. Mesmo assim numa análise anual é possível perceber que as coberturas semi-intensiva e intensiva têm uma eficiência energética superior à cobertura de referência.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Os resultados obtidos demonstram que é possível considerar este tipo de solução como uma opção que permite aumentar a eficiência energética em edifícios residenciais submetidas ao clima português. Para o futuro próximo sugere-se que sejam desenvolvidos estudos com o intuito de aprofundar outros benefícios conseguidos através da adoção de coberturas verdes, por exemplo:

- Considerar as várias fases de crescimento e decaimento da vegetação que originam diferentes índices de área de folhas que posteriormente pode ser considerado no verão, pois é favorável, e admitindo o seu decaimento na época mais fria de modo à obtenção de um melhor aproveitamento da radiação solar na cobertura semi-intensiva e intensiva;
- Considerar diferentes tipos de solo com diferentes condutibilidades térmicas e de vegetação com diferentes características de albedo e *LAI*;
- Realizar um estudo económico englobando o custo de investimento e de manutenção das coberturas verdes. Estudar também o período do retorno deste tipo de solução e posteriormente comparar com os custos de uma solução tradicional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEmet (2000). “Atlas Climático Ibérico - *Iberian Climate Atlas*” *Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino*
- Almeida, E. S. S. (2013). "Casas passivas: conceito passivhaus em climas mediterrâneos" Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Ascione, F.; Bianco, N.; Rossi, F.; Turni, G., Vanoli; G. (2013). “Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning?” *Applied Energy* 104, p. 845–859.
- Berardi, U. (2016). “The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits” *Energy and buildings* 121, p. 217 – 229
- Berndtsson, J. C. (2010).” Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review” *Ecological Engineering* 36, p. 351-360
- Bevilacqua, P.; Mazzeo, D.; Bruno, R.; Arcuri, N. (2016). “Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area” *Energy and Buildings* 122, p. 63-79.
- Coma, J.; Pérez, G.; Solé, C.; Castell, A.; Cabeza, Luisa F (2016). “Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings” *Renewable Energy* 85, p. 1106-1115
- Cardoso, F. e Ascenso, R. (2011). “*Passivhaus, As novas casas passivas*”. *Climatização – Edifícios e Energia*.
- David J. Sailor, Ph.D. Elley, and M. Gibson (2012). “Building Energy Effects of Green Roof Design Decisions” *Mechanical and Materials Engineering Department, Portland State University*

Diretiva 2012/27/EU (2012). “Diretiva 2012/27/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de Outubro de 2012 relativa à eficiência energética, que altera as Diretivas 2009/125/CE e 2010/30/EU e revoga as Diretivas 2004/8/CE e 2006/32/CE” Jornal Oficial da União Europeia

DGEG (2015). “Direção-geral de Energia e Geologia - Energia em Portugal 2013” Ministério do Ambiente do Território e Energia

EnergyPlus Engineering Reference (2013). Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. US Department of Energy, EUA.

Figueiredo, A.; Figueira, J.; Vicente, R.; Maio, R. (2016). “Thermal comfort and energy performance: Sensitivity analysis to apply the Passive House concept to the Portuguese climate” Building and Environment 103, p. 276-288.

Figueiredo, A.; Kampf, J.; Vicente, R. (2016). “Passive house optimization for Portugal: Overheating evaluation and energy performance” Energy and Buildings 118, p. 181-196.

Gervásio, H.; Santos, P.; Simões da Silva, L. (2014). “A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design” Building and Environment 73, p. 256-270

Passive-On Project (2007a). “A descrição longa do Passive-On”. European Commission under the Intelligent Energy – Europe Programme.

Passive-On Project (2007b). “Na direcção de casas passivas – Mecanismos de apoio ao desenvolvimento do mercado de casas passivas”. European Commission under the Intelligent Energy – Europe Programme.

Passive-On Project (2007c). “A norma Passivhaus em climas quentes da Europa – Directrizes de projecto para casas confortáveis de baixo consumo energético, Parte 1: Revisão de casas confortáveis de baixo consumo energético”. European Commission under the Intelligent Energy – Europe Programme.

Retzlaff B., Ebbs S., Morgan S. and Celik S. (2011). “Digging into Green” Southern Illinois University Edwardsville performs extensive green roof system research.

Sailor, D.J. (2008). “A green roof model for building energy simulation programs” Energy and Buildings 40, p. 1466-1478

Silva, C. M.; Gomes, M. G.; Silva, M. (2016). “Green roofs energy performance in Mediterranean climate” *Energy and Buildings* 116, p. 318–325.

Silva, M. F. R. (2014). “Green roof energy simulation” *DECivil*, Instituto Superior Técnico, Lisboa

Tassi, R.; Tassinari, L.C. da Silva; Picilli, D. G. A.; Persch, C. G. (2014). “Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão de águas pluviais” *Porto Alegre*, v.14, n.1, p.139-154.

Coolhaven@, (2016). <http://www.coolhaven.pt/conceito/conceito.php>

Clima@, (2016). <http://pt.climate-data.org/location/160/>

Design@ (2016). <http://www.designbuilder.co.uk/>

Energy@, (2016). <https://energyplus.net/>

Eurostat@ (2015). <http://ec.europa.eu/eurostat>

Europa@ (2016). http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_en.htm

Passiopedia@(2016).http://passiopedia.org/basics/the_passive_house_-_historical_review. Passive House Institute (PHI) (Página Internet Oficial).

Passiv@(2015).http://passiopedia.org/detail/picopen/passivhaus_kranichstein_sued.jpg?id=basics%3Athe_passive_house_-_historical_review. Passivhaus Institut (PHI) (Página Internet Oficial).

Passive@(2016).http://passivehouse.com/02_informations/01_what_is_a_passive_house/01_what_is_a_passive_house.htm. Passive House Institute (PHI) (Página Internet Oficial).

Passivehouse@(2016).http://passivehouse.com/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm. Passive House Institute (PHI) (Página Internet Oficial).

Restora@ (2016). <http://www.restorationgardens.ca/green-roof-layers-and-systems/>